Физические величины

СПРАВОЧНИК

Под редакцией
И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова

МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1991

УДК 53.081 (035.5)

Физические величины: Справочник/А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.; Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с. — ISBN 5-283-04013-5

Приведены основные физические характеристики веществ, наиболее часто используемых в практике научных исследований и в технике. Представлены следующие разделы: механика, термодинамика, кинетические явления, электричество и магнетизм, оптика и лазеры, ядерная физика, астрономия и геофизика. Все величины приведены в СИ. Таблицы и графики сопровождаются краткими пояснениями и определениями соответствующих величин.

Для научных работников и инженеров различных специальностей.

Авторы: А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский, М. Е. Бродов, М. В. Быстров, Б. В. Виноградов, Л. И. Винокурова, Э. Б. Гельман, А. П. Геппе, И. С. Григорьев, К. Г. Гуртовой, В. С. Егоров, А. В. Елецкий, Л. К. Заремба, В. Ю. Иванов, В. Л. Ивашинцева, В. В. Игнатьев, Р. М. Имамов, А. В. Инюшкин, Н. В. Кадобнова, И. И. Карасик, К. А. Кикоин, В. А. Криворучко, В. М. Кулаков, С. Д. Лазарев, Т. М. Лифшиц, Ю. Э. Любарский, С. В. Марин, И. А. Маслов, Е. З. Мейлихов, А. И. Мигачев, С. А. Миронов, А. Л. Мусатов, Ю. П. Никитин, Л. А. Новицкий, А. И. Обухов, В. И. Ожогин, Р. В. Писарев, Ю. В. Писаревский, В. С. Птускин, А. А. Радциг, В. П. Рудаков, Б. Д. Сумм, Р. А. Сюняев, М. Н. Хлопкин, И. Н. Хлюстиков, В. М. Черепанов, А. Г. Чертов, В. Г. Шапиро, В. М. Шустряков, С. С. Якимов, В. П. Яновский.

Рецензенты: А. А. Александров (гл. 13), Г. Н. Афанасьев (гл. 35, 38), О. А. Барсуков (гл. 43), Э. А. Бельская (гл. 15), Ю. П. Гайдуков (гл. 30), А. А. Горбатов (гл. 7), Ю. Н. Денисов (гл. 34), И. С. Желудев (гл. 2), Е. А. Иванов (гл. 36), С. С. Иванов (гл. 44), Д. Н. Каган (гл. 9), А. Д. Козлов (гл. 1), Н. С. Костюков (гл. 23), С. А. Ламзин (гл. 45), Р. З. Левитин (гл. 26, 27, 29), Ю. В. Мамонов (гл. 12), Б. А. Мамырин (гл. 1), В. П. Машкович (гл. 1), Н. М. Михин (гл. 6), А. Г. Мозговой (гл. 11), М. П. Орлова (гл. 8), В. В. Пашкевич (гл. 37, 40), В. Э. Пелецкий (гл. 21, 24, 31), В. А. Петухов (гл. 10), А. Н. Подмарьков (гл. 22), А. В. Пустогаров (гл. 25), В. В. Рощупкин (гл. 5), У. И. Сафронова (гл. 32), С. Н. Сковородько (гл. 4, 14), В. И. Соколов (гл. 28), Е. А. Ступицкий (гл. 18, 19), Л. П. Филиппов (гл. 16, 17, 20), В. И. Фурман (гл. 39), В. И. Цовбун (гл. 41, 42), М. В. Четкин (гл. 33), М. Ф. Шешенев (гл. 3)

Справочное издание

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Редакторы З. Д. Андреенко, О. П. Дунаева, Е. В. Сатарова
Художественные редакторы А. Т. Кирьянов, А. А. Белоус
Технический редактор В. В. Ханаева
Корректоры И. А. Володяева, М. Г. Гулина, З. Б. Драновская
ИБ № 2264

Сдано в набор 28.04.87. Подписано в печать 21.02.89. Т-04136. Формат 84×108¹/₁₆. Бумага имп. кн.-журн. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 129,36. Усл. кр.-отт. 129,78. Уч.-изд. л. 163,81. Тираж 50 000 экз. Заказ 2159. Цена 12 р. 00 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская Ордена Трудового Красного Знамени типография № 2 Госкомпечати СССР. Москва, 129301, пр. Мира, 105

Ф $\frac{1604000000-271}{051(01)-91}$ КБ-8-27-90

© Авторы, 1991

ISBN 5-283-04013-5

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 8

Глава 1. ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН. *А. Г. Чертов* 9

1.1. Общие положения 9
1.2. Единицы Международной системы . . . 9
Основные величины и единицы СИ 9
Дополнительные единицы 10
Производные единицы СИ по разделам физики 10
Пространство и время. Периодические и связанные с ними явления. Механика. Теплота. Электричество и магнетизм. Оптика. Акустика. Физическая химия и молекулярная физика. Атомная и ядерная физика 17
1.3. Рекомендуемые величины и единицы ионизирующих излучений 18
Величины и единицы, характеризующие ионизирующее излучение и его поле. Величины и единицы, характеризующие взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Дозиметрические величины и единицы. Величины и единицы, характеризующие источники ионизирующих излучений. О поридке внедрения ГОСТ 8.417—81 в области измерения ионизирующих излучений 23
1.4. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования 23
1.5. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ . . 24
1.6. Перечень некоторых относительных и логарифмических величин и их единиц . . . 24
1.7. Единицы, временно допускаемые к применению 25
1.8 Соотношения некоторых внесистемных единиц с единицами СИ 26
1.9. Соотношения между единицами электромагнитных величин в системах СГС и СИ 27
1.10. Соотношения внесистемных единиц радиоактивности и ионизирующих излучений с единицами СИ 28
1.11 Соотношение системы атомных единиц Хартри $e=m_e=\hbar$ и системы релятивистских единиц $c=m_e=\hbar$ с единицами СИ 28
1.12. Рекомендуемые кратные и дольные единицы от единиц СИ и от единиц, применяемых наравне с единицами СИ 29
1.13. Соотношения между единицами физических величин 30
Длина. Площадь. Объем. Плоский угол. Телесный угол. Время. Температура. Скорость. Ускорение. Угловая скорость. Частота вращения. Масса. Плотность. Линейная плотность. Сила. Давление. Импульс (количество движения). Момент силы. Момент импульса (момент количества движения). Напряжение (механическое). Работа, энергия. Мощность. Динамическая вязкость. Кинематическая вязкость. Объемный расход. Количество теплоты (теплота). Удельная теплоемкость. Молярная теплоемкость. Теплопроводность (коэффициент теплопроводности). Электрический заряд. Напряженность электрического поля. Электрическнй момент. Плотность тока. Удельное электрическое сопротивление. Удельная электрическая проводимость. Магнитная индукция. Магнитный поток. Напряженность магнитного поля. Магнитодвижущая сила. Магнитный момент. Яркость. Поглощенная доза. Эквивалентная доза. Активность нуклида в радиоактивном источнике. Экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучений 33
1.14. Фундаментальные физические постоянные . 33
Список литературы 33

Глава 2. СИММЕТРИЙНОЕ И ТЕНЗОРНОЕ ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ. *Ю. В. Писаревский* 34

2.1. Симметрия кристаллов 34
Точечные группы. Кристаллографические классы. Пространственные группы симметрии. Магнитная симметрия. Предельные группы. Кристаллографическая система координат . 39
2.2. Физические свойства кристаллов 41
Кристаллографическая система координат . Симметрия физических свойств. Матричное описание физических свойств кристаллов. Влияние внешнего воздействия 45
Список литературы 45

Глава 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ. *Н. В. Кадобнова, А. М. Братковский* 46

3.1. Общие сведения 46
3.2. Механические свойства при температуре 20°С 46
Металлы. Стали. Алюминиевые сплавы. Титановые сплавы. Магниевые сплавы. Медные сплавы и сплавы на основе олова и свинца. Жаропрочные сплавы и сплавы на основе тугоплавких металлов. Композиционные материалы. Пластмассы, металлокерамика и другие материалы. Минералы и волокна . . . 64
3.3. Механические свойства при низких и высоких температурах 66
3.4. Выносливость материалов 77
3.5. Характеристики разрушения 80
3.6. Механические свойства аморфных металлов и сплавов 83
Список литературы 85

Глава 4. СЖИМАЕМОСТЬ. *Б. В. Виноградов* 86

4.1. Введение 86
4.2. Сжимаемость твердых тел 87
4.3. Сжимаемость жидкостей и газов 94
Список литературы 97

Глава 5. ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВ. *А. П. Бабичев* 98

5.1. Введение 98
5.2. Элементы 99
5.3. Неорганические вещества 100
5.4. Органические вещества 111
5.5. Сплавы, минералы, дерево и другие твердые вещества 120
5.6. Пластмассы 122
5.7. Жидкости 123
5.8. Ртуть при различной температуре и атмосферном давлении 123
5.9. Дистиллированная вода при различной температуре и атмосферном давлении . . 124
Список литературы 124

Глава 6. ТРЕНИЕ. *И. И. Карасик* 124

6.1. Введение 124
6.2. Адгезионная связь при трении скольжения 126
6.3. Трение покоя 127
6.4. Трение скольжения без смазывания . . . 128
6.5. Трение смазанных поверхностей и твердосмазочных покрытий 130
6.6. Трение по льду и снегу 131
6.7. Трение в вакууме 131
6.8. Трение качения 132
Список литературы 132

Глава 7. АКУСТИКА. *Л. К. Заремба* . . . 133

7.1. Введение 133
7.2. Распространение звука в газах и парах . 134
Скорость звука. Затухание звука
7.3. Распространение звука в жидкостях . . . 137
Скорость звука. Нелинейные механические характеристики жидкостей. Поглощение звука в жидкостях
7.4. Распространение звука в твердых телах . 148
Скорость звука. Затухание звука 156
Список литературы 166

Глава 8. ТЕРМОМЕТРИЯ. *А. В. Инюшкин* . 172

8.1. Общие сведения 172
8.2. Температурные шкалы 172
8.3. Жидкостно-стеклянные термометры . . . 178
8.4. Термометры сопротивления 179
8.5. Термоэлектрические термометры 179
8.6. Конденсационные термометры 187
8.7. Оптическая пирометрия 191
8.8. Термоиндикаторы и кристаллические измерители максимальной температуры . . 194
Список литературы 195

Глава 9. ТЕПЛОЕМКОСТЬ. *М. Н. Хлопкин* . 197

9.1. Общие сведения 197
Определение и единицы теплоемкости. Теплоемкость твердых тел. Теплоемкость разряженных газов. Теплоемкость плотных газов и жидкостей. Теплоемкость сплавов, растворов и смесей. Теплоемкость вблизи фазовых переходов. Справочная литература по теплоемкости 198
9.2. Теплоемкость элементов 198
9.3. Теплоемкость неорганических соединений . 207
9.4. Теплоемкость органических соединений . 214
9.5. Теплоемкость растворов, смесей, сплавов и технических материалов 217
Список литературы 220

Глава 10. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСШИРЕНИЯ. *Э. Б. Гельман* . . . 222

10.1. Введение 222
10.2. Температурные коэффициенты линейного расширения твердых тел 223
Элементы в кристаллическом состоянии. Индивидуальные соединения. Неорганические соединения при температуре выше 1000 К. Кварцевые и оптические стекла. Технические стекла. Ситаллы. Чугуны. Стали, хром-никелевые, хром-кобальтовые и другие сплавы. Цветные металлы и сплавы. Алюминиевые сплавы. Пластмассы. Строительные материалы 251
10.3. Температурные коэффициенты объемного расширения жидкостей и газов 251
Элементы и неорганические соединения. Органические соединения 252
Список литературы 253

Глава 11. ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ. *В. В. Игнатьев, В. А. Криворучко, А. И. Мигачев* 254

11.1. Пары воды 254
11.2. Пары неорганических веществ 255
11.3. Пары органических веществ 268
11.4. Коэффициент разделения изотопных молекул 284
Список литературы 286

Глава 12. ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ. *Э. Б. Гельман* 288

12.1. Введение 288
12.2. Плавление и кипение при постоянном давлении 288
Элементы. Неорганические соединения. Органические соединения. Полупроводниковые и оптические материалы. Высокотемпературные материалы. Стали и промышленные сплавы. Двухкомпонентные сплавы. Легкоплавкие сплавы. Стекла. Полимерные материалы. Топливо, масло, гидравлические жидкости. Хладоны и теплоносители 309
12.3. Плавление и кипение в зависимости от давления 309
Элементы. Неорганические соединения. Органические соединения 314
Список литературы 314

Глава 13. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ. *Э. Б. Гельман* 315

13.1. Уравнение состояния твердого тела . . 315
Постояниая Грюнейзена и параметры уравнения состояния Миг — Грюнейзена некоторых веществ 315
13.2. Уравнение состояния газа 315
Второй вириальный коэффициент. Третий вириальный коэффициент 317
13.3. Критические параметры веществ . . . 317
Простые вещества. Неорганические соединения. Органические соединения 328
Список литературы 329

Глава 14. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ. *Б. Д. Сумм* 330

14.1. Введение 330
14.2. Сжиженные газы 331
14.3. Вода 332
14.4. Органические вещества 332

14.5. Жидкие металлы 335
14.6. Расплавы солей 336
14.7. Твердые металлы 337
Список литературы 337

Глава 15 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ. *А. В. Инюшкин* 337

15.1. Общие сведения 337
15.2. Теплопроводность простейших химических веществ 337
15.3. Теплопроводность газов и паров 338
15.4. Теплопроводность жидкостей 339
15.5. Теплопроводность твердых тел 339
Список литературы 339

Глава 16. ВЯЗКОСТЬ. *А. В. Елецкий* . . . 363

16.1. Введение 364
16.2. Вязкость газов 364
16.3. Вязкость жидкостей 370
Список литературы 374

Глава 17. ДИФФУЗИЯ. *А. В. Елецкий* . . 375

17.1. Введение 375
17.2. Диффузия атомов и молекул в газах . . 375
17.3. Диффузия в жидкостях 376
17.4. Диффузия в твердых веществах 378
Список литературы 390

Глава 18. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ И ПЛАЗМЕ. *А. В. Елецкий* 391

18.1. Колебательная релаксация молекул в газах 391
18.2. Рассеяние электронов на атомах и молекулах 393
18.3. Процессы ионизации с участием возбужденных атомов 395
18.4. Процессы резонансной перезарядки . . 395
18.5. Ионно-молекулярные реакции 396
18.6. Процессы нейтрализации заряженных частиц в плазме 398
18.7. Процессы образования и разрушения отрицательных ионов 399
18.8. Процессы тушения возбужденных атомов и молекул при столкновениях с тяжелыми частицами 407
18.9. Фотоионизация и фоторекомбинация . . 409
Список литературы 410

Глава 19. ИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ и МОЛЕКУЛ. *А. А. Радциг, В. М. Шустряков* 411

19.1. Введение 411
19.2. Потенциал ионизации атомных и молекулярных частиц 411
19.3. Энергия связи электронов во внутренних оболочках атомов 420
19.4. Энергия сродства атомов и молекул к электрону 420
19.5. Энергия сродства атомов и молекул к протону 420
19.6. Эффективные сечения ионизации атомов и молекул электронами 422
Список литературы 429

Глава 20. ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ. *А. В. Елецкий* 430

20.1. Диффузия и подвижность заряженных частиц в слабоионизованной плазме . . . 430
20.2. Вязкость слабоионизованной плазмы . . 436
20.3. Теплопроводность ионизованного газа . . 436
Список литературы 437

Глава 21. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. *В. С. Егоров, И. Н. Хлюстиков* 437

21.1. Введение 437
21.2. Чистые металлы 438
21.3. Влияние всестороннего сжатия на сопротивление металлов 440
21.4. Электрические свойства некоторых металлов и сплавов 444
21.5. Сверхпроводники 448
Список литературы 453

Глава 22. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ. *С. Д. Лазарев. Е. З. Мейлихов* 454

22.1. Введение 454
22.2. Элементарные полупроводники 455
22.2.1. Кремний и германий 455
22.3. Полупроводниковые соединения 469
22.3.1. Соединения типа $A^{I}B^{I}$—$A^{I}B^{VII}$ . . . 469
22.3.2. Соединения типа $A^{II}B^{IV}$—$A^{II}B^{VII}$ . . 469
22.3.3 Соединения типа $A^{III}B^{IV}$—$A^{III}B^{VII}$ . . 500
22.3.4. Соединения типа $A^{IV}B^{IV}$—$A^{IV}B^{VI}$ . . 517
22.3.5. Соединения типа $A^{V}B^{V}$—$A^{V}B^{VIII}$ . . 530
22.3.6. Соединения типа $A^{VI}B^{IV}$—$A^{VI}B^{VI}$ . . 535
22.3.7. Соединения типа $A^{VII}B^{III}$—$A^{VII}B^{VI}$. 537
22.3.8. Соединения типа $A^{III}B^{V}$—$A^{III}B^{VI}$ . . . 537
Список литературы 538

Глава 23. ДИЭЛЕКТРИКИ. *А. П. Геппе* . 543

23.1. Общие сведения 543
23.2. Газообразные диэлектрики 545
23.3. Жидкие диэлектрики 548
23.4. Твердые диэлектрики 549
23.5. Активные диэлектрики 557
Список литературы 559

Глава 24. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ. *Н. А. Бабушкина.* 559

Список литературы 566

Глава 25. ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ЭМИССИЯ. *Т. М. Лифшиц, А. Л. Мусатов* . . 567

25.1. Вводные замечания 567
25.2. Работа выхода 567
25.3. Термоэлектронная эмиссия 570
25.4. Фотоэлектронная эмиссия 574
25.5. Вторичная электронная эмиссия . . . 582
25.6. Полевая электронная эмиссия 587
25.7. Ионная и ионно-электронная эмиссия . . 590
Список литературы 592

Глава 26. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИА- И ПАРАМАГНЕТИКОВ. *В. Ю. Иванов, Л. И. Винокурова* 593

Список литературы 610

Глава 27. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. *К. Г. Гуртовой* 613

27.1. Вводные замечания 613
27.2. Элементы 614
27.3. Сплавы 623
27.4. Металлические магнитные материалы . . 636
Список литературы 646

Глава 28. АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ. *В. И. Ожогин, В. Г. Шапиро* 648
28.1. Вводные замечания 648
28.2. Основные магнитные свойства легкоосных антиферромагнетиков (на примере MnF_2) . 648
28.3. Осиовные магнитные свойства легкоплоскостных антиферромагнетиков (на примере $MnCO_3$, $CoCO_3$) 650
28.4. Метамагнетики 651
28.5. Антиферромагнетики со взаимодействием Дзялошинского 651
28.6. Пьезомагнетики и магнитоэлектрики . . 652
28.7. Акустомагнетики 652
28.8. Органические сверхпроводники 652
28.9. Некоторые свойства антиферромагнетиков 652
Список литературы 705

Глава 29. ФЕРРИТЫ И ДРУГИЕ МАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ. *М. В. Быстров, В. Л. Ивашинцева, С. А. Миронов, Р. В. Писарев* 707
29.1. Общие сведения 709
29.2. Ферриты-шпинели 709
А. Простые ферриты. 709
Б. Смешанные ферриты 710
29.3. Ферриты со структурой граната 716
29.4. Гексагональные ферриты 726
29.5. Некоторые ферро- и ферримагнитные диэлектрики 732
Список литературы 733

Глава 30. ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. *Н. А. Бабушкина* 736
30.1. Общие сведения 736
30.2. Топология поверхности Ферми металлов . 739
30.3. Влияние магнитного поля на электрическое сопротивление металлов 744
30.4. Коэффициенты Холла металлов 755
30.5. Коэффициенты Холла ферромагнетиков и редкоземельных металлов 760
30.6. Термомагнитные коэффициенты металлов . 763
Список литературы 764

Глава 31. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ. *Л. А. Новицкий* 766
31.1. Общие сведения 766
31.2. Оптические стекла 770
31.3. Поляризационные, магнитооптические и электрооптические материалы 775
31.4. Оптические кристаллы и оптическая керамика 777
31.5. Лакокрасочные материалы 778
31.6. Металлы и сплавы 779
31.7. Графитовые материалы 785
31.8. Полимерные материалы 785
31.9. Строительные материалы 786
31.10. Окислы, бориды, карбиды и нитриды тугоплавких металлов 788
31.11. Земные покровы и природные минералы . 788
31.12. Лунные грунты 789
31.13. Жидкости, отвержденные вещества . . 790
31.14. Газы и плазма 791
Список литературы 793

Глава 32. СПЕКТРЫ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ. *А. А. Радциг* 794
32.1. Введение 794
32.2. Оптические спектры атомов 794
32.3. Тонкая структура уровней энергии атомов 838
32.4. Сверхтонкая структура уровней энергии атомов 839
32.5. Изотопическая структура атомных спектров 846
32.6. Спектры двухатомных молекул 849
Список литературы 859

Глава 33. ЭЛЕКТРО-, МАГНИТО-, ПЬЕЗООПТИЧЕСКИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. *М. Е. Бродов, В. П. Яновский* 860
33.1. Общие сведения 860
33.2. Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) 860
33.3. Магнитное вращение плоскости поляризации (эффект Фарадея) 865
33.4. Квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра) 872
33.5. Эффект фотоупругости 873
33.6. Оптическая активность 877
33.7. Генерация второй гармоники в кристаллах Показатели преломления нелинейных кристаллов 877
33.8. Вынужденное рассеяние света 884
Список литературы 893
894

Глава 34. ЛАЗЕРЫ. *М. Е. Бродов, В. П. Яновский* 895
34.1. Вводные замечания 895
34.2. Газовые лазеры 895
34.3. Лазеры на примесных кристаллах . . . 924
34.4. Характеристики промышленных неодимовых лазерных стекол 943
34.5. Полупроводниковые лазеры 946
34.6. Жидкостные лазеры с редкоземельными активаторами 948
34.7. Лазеры на красителях 950
34.8. Твердотельные лазеры на центрах окраски 957
Список литературы 958

Глава 35. РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. *Р. М. Имамов* 959
35.1. Получение и свойства рентгеновского излучения 959
35.2. Характеристический спектр рентгеновского излучения 959
35.3. Длины волн основных линий и краев поглощения рентгеновского излучения . . . 961
35.4. Ширина линий рентгеновского излучения . 964
35.5. Относительные интенсивности линий . . 966
35.6. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом 966
35.7. Вторичные спектры и эффекты химической связи в рентгеновской спектроскопии . . 968
Список литературы 970

Глава 36. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. *Ю. П. Никитин* 970
36.1. Вводные замечания 970
36.2. Классификация взаимодействий и основные группы элементарных частиц . . . 970
36.3. Законы сохранения и внутренние симметрии 971
36.4. Кварковая структура адронов 971
36.5. Электрослабое и сильное взаимодействия . 973
36.6. Элементарные частицы, стабильные по отношению к распадам по сильному взаимодействию 973
36.7. Мезонные резонансы 992
36.8. Барионные резонансы 992

36.9. Магнитные моменты элементарных частиц . . . 992
36.10. Параметры распадов элементарных частиц . . . 993
Список литературы . . . 993

Глава 37. ЯДЕРНЫЕ СВОЙСТВА НУКЛИДОВ. *В. М. Кулаков* . . . 993
37.1. Таблица нуклидов . . . 993
37.2. Эталонные энергии γ-излучения, α-частиц и конверсионных электронов . . . 1044
37.3. Квантовые характеристики ядер . . . 1047
37.4. Радиоактивные ряды . . . 1051
Список литературы . . . 1054

Глава 38. МЁССБАУЭРОВСКИЕ ЯДРА. *С. С. Якимов, В. М. Черепанов* . . . 1054
38.1. Общие сведения . . . 1054
38.2. Характеристики мёссбауэровских ядер . . . 1055
38.3. Параметры мёссбауэровских спектров . . . 1062
38.4. Изомерный сдвиг . . . 1066
Список литературы . . . 1068

Глава 39. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. *В. П. Рудаков* . . . 1068
39.1. Вводные замечания . . . 1068
39.2. Сечение резерфордовского рассеяния . . . 1069
39.3. Энергия ядерной реакции . . . 1069
39.4. Порог ядерной реакции . . . 1085
39.5. Кулоновский барьер . . . 1086
39.6. Кинематика ядерных реакций . . . 1086
Список литературы . . . 1087

Глава 40. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР. *А. И. Обухов, И. С. Григорьев* . . . 1087
40.1. Вводные замечания . . . 1087
40.2. Барьеры деления ядер . . . 1088
40.3. Спонтанное деление . . . 1089
40.4. Сечения деления ядер . . . 1091
40.5. Энергия, выделяемая при делении . . . 1093
40.6. Продукты деления ядер . . . 1094
40.7. Нейтроны деления . . . 1095
40.8. Мгновенное γ-излучение . . . 1099
40.9. Запаздывающее излучение продуктов деления . . . 1095
Список литературы . . . 1096

Глава 41. ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО. *С. В. Марин* . . . 1099
41.1. Общие замечания . . . 1099
41.2. Основные характеристики нейтрона . . . 1100
41.3. Нейтронные сечения . . . 1101
41.4. Механизм ядерных реакций с участием нейтронов . . . 1102
41.5. Сечения ядерных реакций для нейтронов тепловой энергии . . . 1102
41.6. Графики зависимости полных сечений от энергии . . . 1114
41.7. Резонансные интегралы . . . 1122
41.8. Ядерная реакция $(n, 2n)$ . . . 1127
41.9. Ядерная реакция (n, p) . . . 1134
41.10 Ядерная реакция (n, α) . . . 1134
41.11. Ядерная реакция (n, t) . . . 1134
41.12. Активационные детекторы . . . 1134
41.13. Замедление нейтронов . . . 1137
41.14. Диффузия нейтронов . . . 1138
Список литературы . . . 1139

Глава 42. ПРОХОЖДЕНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО. *В. П. Рудаков* . . . 1141
42.1. Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество . . . 1141
42.2. Многократное рассеяние при прохождении заряженных частиц через вещество . . . 1167
42.3. Прохождение электронов через вещество . . . 1170
42.4. Прохождение гамма-излучения через вещество . . . 1170
Список литературы . . . 1172

Глава 43. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ. *В. С. Птускин* . . . 1173
43.1. Источники космических лучей . . . 1173
43.2. Галактические космические лучи . . . 1173
43.3. Модуляция галактических космических лучей в межпланетном пространстве . . . 1175
43.4. Солнечные космические лучи . . . 1176
43.5. Геомагнитные эффекты . . . 1178
43.6. Космические лучи в атмосфере Земли . . . 1178
Список литературы . . . 1179

Глава 44. ФИЗИКА ЗЕМЛИ. *И. А. Маслов* . . . 1180
44.1. Общие характеристики Земли . . . 1180
Фигура Земли
Строение Земли . . . 1180
44.2. Литосфера . . . 1181
Состав и свойства. Поле силы тяжести. Сейсмичность. Магнитное поле. Тепловое поле 1187
44.3. Гидросфера . . . 1188
Мировой океан. Состав и свойства вод. Физические свойства океанической воды и льда. Физические свойства морского льда. Оптические свойства океанической воды. Радиоактивность океанической воды. Скорость звука в океане . . . 1192
44.4. Атмосфера . . . 1192
Строение атмосферы. Радиационный баланс атмосферы. Электрические явления в атмосфере . . . 1195
Список литературы . . . 1196

Глава 45. АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА. *Ю. Э. Любарский, Р. А. Сюняев* . . . 1197
45.1. Некоторые астрономические единицы и постоянные . . . 1197
45.2. Солнце . . . 1198
45.3. Планеты и спутники, межпланетная среда . . . 1201
45.4. Звезды . . . 1208
45.5. Наша Галактика . . . 1214
45.6. Галактики и Вселенная . . . 1223
Список литературы . . . 1229

Глава 46. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ. *К. А. Кикоин* . . . 1231
Список литературы . . . 1232

ПРЕДИСЛОВИЕ

Более 10 лет назад под редакцией академика И. К. Кикоина был издан универсальный справочник «Таблицы физических величин», который стал достаточно популярным среди специалистов различного ранга. Однако любой справочник при всех своих достоинствах со временем неизбежно устаревает. Не избежали этого и «Таблицы физических величин». Сначала казалось, что исправить их можно «косметическими» методами — устранением ошибок, небольшой корректировкой и дополнениями. Но с течением времени стало ясно, что необходима более глубокая, а в ряде случаев и коренная переработка материала с привлечением новых физических данных и с новым коллективом авторов. Так родилась идея издания нового универсального физического справочника. Однако воплотить ее в жизнь Иссак Константинович не успел: под его руководством была выработана лишь общая концепция справочника и намечен коллектив авторов. На протяжении работы, которую нам пришлось выполнять уже без него, мы неоднократно сталкивались с различного рода сложными ситуациями и трудностями (касающимися отбора материала, его подачи, сложностей общения с большим коллективом авторов и т. д.), решение которых оказалось возможным в значительной мере благодаря обращению к тем идеям и принципам, которые были выработаны в совместных обсуждениях с И. К. Кикоиным. Поэтому все возможные достоинства справочника должны быть связаны с его именем, в то время как за все недостатки целиком и полностью отвечаем мы.

При работе над таким универсальным физическим справочником, коим, по нашему мнению, должен был стать справочник «Физические величины», необходимо было ясно представить себе его будущих пользователей. Для нас это — специалисты различного уровня (студенты, аспиранты, инженеры, научные работники), испытывающие потребность в конкретной числовой информации, не относящейся к их узкой специализации. В соответствии с этим мы старались отобрать для справочника такой материал, который мог бы помочь пользователям в их повседневной работе, а форма его подачи давала бы возможность легко использовать такой материал неспециалистам. Поэтому мы сочли необходимым дать в каждой главе сводку основных понятий соответствующего раздела физики, привести единицы наиболее важных физических величин и, по возможности, дать ссылки на более специализированные издания. При отборе числовых данных мы ограничивались, как правило, наиболее надежными из них (хотя, справедливости ради, следует сказать, что критерии надежности по необходимости весьма субъективны и различны у разных авторов). Там, где это было возможно и удобно, данные представлены всегда в виде графиков и рисунков. Другая проблема, стоявшая пред нами, — избежать дублирования данных в различных главах. В противном случае объем справочника стал бы непомерно большим. Полнота охвата материала в справочнике и его тематическая разнородность привели к тому, что единообразия подачи материала выдержать по всем главам в полной мере не удалось. Не исключено, что эта задача вообще неразрешима.

Сначала у нас была мысль снабдить справочник «инструкцией для пользователей», которая помогала бы ориентироваться в материале. Однако в конце концов мы пришли к выводу, что принятая форма организации материала справочника достаточно проста и легко позволяет найти «ключ» к нему.

Количество недочетов различного рода обычно пропорционально объему печатного материала. Сознавая это, мы старались тщательно проверить весь материал. Не исключено, однако, что что-то выпало из нашего поля зрения. Мы будем чрезвычайно признательны тем читателям, которые укажут нам на недостатки и тем самым позволят исправить их при последующих изданиях.

И. С. Григорьев
Е. З. Мейлихов

ГЛАВА 1

ЕДИНИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

А. Г. Чертов

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Единицы физических величин, допущенные к применению на территории СССР, их наименования, определения и обозначения установлены государственными стандартами:

«ГСИ: Единицы физических величин» ГОСТ 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78);

ГОСТ 15484—81 «Излучения ионизирующие и их измерения: Термины и определения», а также руководящими нормативными документами:

РД 50—160—79 «Методические указания. Внедрение и применение СТ СЭВ 1052—78 «Метрология. Единицы физических величин»;

РД 50—454—84 «Методические указания: Внедрение и применение ГОСТ 8.417—81 «ГСИ: Единицы физических величин» в области ионизирующих излучений;

МИ 221—81 «Методика внедрения СТ СЭВ 1052—78 «Метрология. Единицы физических величин» в области измерений давления, силы и теплофизических измерений».

В соответствии с перечисленными документами:

1. Подлежат обязательному применению единицы Международной системы единиц [*1], а также десятичные кратные и дольные от них.

2. Допускаются к применению без ограничения срока наравне с единицами СИ внесистемные единицы, указанные в табл. 1.5, а также их сочетания с единицами СИ и нашедшие широкое применение на практике десятичные кратные и дольные от них.

3. Без ограничения срока допускается применять относительные и логарифмические единницы (табл. 1.6), за исключением единицы непер (см. табл. 1.7), а также их сочетания с единицами СИ и нашедшие широкое применение на практике десятичные кратные и дольные от них.

4. Допускаются к применению временно внесистемные единицы, приведенные в табл. 1.7, до принятия по ним соответствующих международных решений.

5. Единицы, приведенные в табл. 1.8, изымаются из обращения в сроки, предусмотренные программами мероприятий, разработанными в соответствии с РД 50—160—79.

6. Стандарт «ГСИ. Единицы физических величин. ГОСТ. 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78)» не распространяется на единицы, применяемые в научных исследованиях и при публикациях их результатов, если в них не рассматривают и не используют результаты измерений конкретных физических величин, а также на единицы величин, оцениваемых по условным шкалам [*1].

1.2. ЕДИНИЦЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ

Основные величины и единицы СИ

Длина l — величина, характеризующая протяженность, удаленность и перемещение тел или их частей вдоль заданной линии; dim l[*2]=L, единица — метр (m; м)[*3].

Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени 1/299 792 458 с.

Масса m — величина, определяющая инертные и гравитационные свойства материальных объектов; dim m=M, единица — килограмм (kg; кг).

Килограмм равен массе международного прототипа килограмма.

Время t — величина, характеризующая последовательную смену явлений и состояний материи, характеризующая длительность их бытия; dim t=T, единица — секунда (s; с).

Секунда равна 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Сила электрического тока I — скалярная величина, равная производной по времени от электрического заряда, переносимого носителями заряда сквозь рассматриваемую поверхность; dim I=I, единица — ампер (A, А).

Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$Н.

Термодинамическая температура T — температура, отсчитываемая по термодинамической шкале температур

[*1] Международная система единиц (международное сокращенное наименование SI, в русской транскрипции СИ) принята в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ) и уточнена на последующих ГКМВ.

[*1] Под условными шкалами понимаются, например, шкалы твердости Роквелла и Виккерса, светочувствительности фотоматериалов.

[*2] dim — сокращение от английского слова dimension, что означает в переводе на русский язык «размерность».

[*3] В скобках даются международное и русское обозначения единицы.

от абсолютного нуля; dim $T=\Theta$, единица — кельвин (К; К).

Кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды.

Примечания:

1. Кроме температуры Кельвина (обозначение T) допускается применять также температуру Цельсия (обозначение t), определяемую выражением $t=T-T_0$, где $T_0=273{,}15$ К по определению. Температура Кельвина выражается в кельвинах, температура Цельсия — в градусах Цельсия (обозначение международное и русское °С). По размеру градус Цельсия равен кельвину (1 °С=1 К).

2. Интервал или разность температур Кельвина выражается в кельвинах. Интервал или разность температур Цельсия допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия.

3. Кроме термодинамической шкалы может быть использована Международная практическая температурная шкала МПТШ-68, которая была рекомендована XIV Генеральной конференцией по мерам и весам. МПТШ-68 базируется на 11 основных и 27 дополнительных реперных точках отсчета (см. гл. 8 «Термометрия») и выбрана таким образом, чтобы температура, измеренная по этой шкале, была близка к термодинамической температуре и разности между ними находились в пределах современной погрешности измерений. $T_{68}=t_{68}+273{,}15$. Индекс 68 может быть опущен, если это не приводит к недоразумениям.

Количество вещества n — величина, равная числу структурных элементов, содержащихся в теле (системе тел); dim $n=N$, единица — моль (mol; моль).

Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.

Сила света I — величина, равная отношению светового потока, распространяющегося от источника излучения в рассматриваемом направлении внутри малого телесного угла к этому телесному углу; dim $I=J$, единица — кандела (cd; кд).

Кандела [*1] равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540\cdot10^{12}$ Гц, сила излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.

Примечание. Единство световых измерений обеспечивается в соответствии с ГОСТ 8.023—74.

Дополнительные единицы

Плоский угол α — геометрическая фигура, образованная двумя лучами (сторонами угла), выходящими из одной точки. Размерности плоский угол не имеет, единица — радиан (rad; рад).

Радиан равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

Телесный угол Ω — часть пространства, заключенного внутри одной полости конической поверхности с замкнутой направляющей. Размерности телесный угол не имеет, единица — стерадиан (sr; ср).

Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

[*1] Новое определение единицы силы света — канделы принято на XVI ГКМВ в октябре 1979 г. Оно позволяет воспроизводить канделу без создания черного тела, что соответственно дает возможность повысить точность ее воспроизведения.

Производные единицы СИ по разделам физики

ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ

Площадь S — величина, характеризующая геометрические фигуры на плоскости и на искривленной поверхности и определяемая в простейших случаях числом заполняющих плоскую фигуру единичных квадратов, т. е. квадратов со стороной, равной единице длины: dim $S=L^2$, единица — квадратный метр (m^2; $м^2$).

Квадратный метр равен площади квадрата со сторонами, длины которых равны 1 м.

Объем, вместимость V — величина, характеризующая геометрические тела и определяемая в простейших случаях числом умещающихся в теле единичных кубов, т. е. кубов с ребром, равным в единице длины; dim $V=L^3$, единица — кубический метр (m^3, $м^3$).

Кубический метр равен объему куба с ребрами, длины которых равны 1 м.

Скорость v — величина, равная первой производной от перемещения по времени:

$$v^{*1} = dr/dt;$$

dim $v=LT^{-1}$, единица — метр в секунду (m/s; м/с).

Метр в секунду равен скорости прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой эта точка за время 1 с перемещается на расстояние 1 м.

Ускорение a — величина, равная первой производной от скорости по времени:

$$a = dv/dt;$$

dim $a=LT^{-2}$, единица — метр на секунду в квадрате (m/s^2; $м/с^2$).

Метр на секунду в квадрате равен ускорению прямолинейно и равноускоренно движущейся точки, при котором за время 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с.

Угловая скорость ω — величина, равная первой производной от угла поворота по времени:

$$\omega = d\varphi/dt;$$

dim $\omega=T^{-1}$, единица — радиан в секунду (rad/s; рад/с).

Радиан в секунду равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого за время 1 с поворачиваются относительно оси на угол 1 рад.

Угловое ускорение ε — величина, определяемая первой производной от угловой скорости по времени:

$$\varepsilon = d\omega/dt;$$

dim $\varepsilon=T^{-2}$, единица-радиан на секунду в квадрате (rad/s^2; $рад/с^2$).

Радиан на секунду в квадрате равен угловому ускорению равноускоренно вращающегося тела, при котором оно за время 1 с изменяет угловую скорость на 1 рад/с.

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ЯВЛЕНИЯ

Фаза колебаний φ — аргумент функции, описывающей величину, изменяющуюся по закону гармонических колебаний. Фаза колебаний не имеет размерности, единица — радиан (rad; рад).

[*1] Здесь и далее обозначения векторных величин даются по их модулю, так как принадлежность величины к разряду векторных не имеет значения при определении ее размерности и единицы.

Период T — интервал времени, в течение которого совершается один цикл периодического процесса; $\dim T = \mathrm{T}$, единица — секунда (s, с).

Частота периодического процесса f, ν — величина обратная периоду; $\dim \nu = \mathrm{T}^{-1}$, единица — герц (Hz; Гц).

Герц равен частоте периодического процесса, при которой за время 1 с совершается один цикл периодического процесса.

Частота вращения n — величина, равная числу оборотов, совершаемых за время 1 с; $\dim n = \mathrm{T}^{-1}$, единица — секунда в минус первой степени (s^{-1}; $\mathrm{с}^{-1}$).

Секунда в минус первой степени равна частоте равномерного вращения, при которой за время 1 с тело совершает один полный оборот.

Волновое число ν — величина, обратная длине волны λ:

$$\nu = 1/\lambda;$$

$\dim \nu = \mathrm{L}^{-1}$, единица — метр в минус первой степени (m^{-1}; $\mathrm{м}^{-1}$).

Метр в минус первой степени равен волновому числу колебаний с длиной волны 1 м.

Коэффициент затухания δ — величина, обратная интервалу τ, в течение которого амплитуда A уменьшается в e раз; $\dim \delta = \mathrm{T}^{-1}$, единица — секунда в минус первой степени (s^{-1}; $\mathrm{с}^{-1}$).

Секунда в минус первой степени равна коэффициенту затухания, при котором за время 1 с амплитуда уменьшается в e раз, где e — основание натурального логарифма.

Коэффициент ослабления μ — величина, характеризующая свойства вещества и равная отношению относительного уменьшения интенсивности dI/I излучений к длине пути dx, пройденного излучением в данном веществе:

$$\mu = \frac{dI/I}{dx};$$

$\dim \mu = \mathrm{L}^{-1}$, единица — метр в минус первой степени (m^{-1}; $\mathrm{м}^{-1}$).

Метр в минус первой степени равен коэффициенту ослабления, при котором на расстоянии в 1 м амплитуда уменьшается в e раз, где e — основание натурального логарифма.

МЕХАНИКА

Плотность ρ — величина, равная отношению массы dm элемента тела к объему dV этого элемента:

$$\rho = dm/dV;$$

$\dim \rho = \mathrm{ML}^{-3}$, единица — килограмм на кубический метр ($\mathrm{kg/m^3}$; $\mathrm{кг/м^3}$).

Килограмм на кубический метр равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 $\mathrm{м^3}$ равна 1 кг.

Удельный объем v — величина, равная отношению объема dV элемента тела к массе dm этого элемента:

$$v = dV/dm;$$

$\dim v = \mathrm{L^3M^{-1}}$, единица — кубический метр на килограмм ($\mathrm{m^3/kg}$; $\mathrm{м^3/кг}$).

Кубический метр на килограмм равен удельному объему однородного вещества, объем которого при массе 1 кг равен 1 $\mathrm{м^3}$.

Импульс (количество движения) p материальной точки — величина, равная произведению массы m материальной точки на ее скорость v:

$$p = mv;$$

$\dim p = \mathrm{LMT^{-1}}$, единица — килограмм-метр в секунду ($\mathrm{kg \cdot m/s}$; $\mathrm{кг \cdot м/с}$).

Килограмм-метр в секунду равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с.

Момент импульса (момент количества движения) L точки, вращающейся вокруг неподвижной оси, — величина, равная произведению импульса точки на расстояние ее до оси вращения:

$$L = mvr;$$

$\dim L = \mathrm{L^2MT^{-1}}$, единица — килограмм-метр в квадрате на секунду ($\mathrm{kg \cdot m^2/s}$; $\mathrm{кг \cdot м^2/с}$).

Килограмм-метр в квадрате на секунду равен моменту импульса материальной точки, движущейся по окружности радиусом 1 м и имеющей импульс 1 кг·м/с.

Момент инерции (динамический момент инерции) J материальной точки относительно некоторой оси — величина, равная произведению массы m материальной точки на квадрат расстояния r ее до оси вращения:

$$J = mr^2;$$

$\dim J = \mathrm{L^2M}$, единица — килограмм-метр в квадрате ($\mathrm{kg \cdot m^2}$; $\mathrm{кг \cdot м^2}$).

Килограмм-метр в квадрате равен моменту инерции материальной точки массой 1 кг, находящейся на расстоянии 1 м от оси вращения.

Сила F — векторная величина, являющаяся мерой механического воздействия на тело со стороны других тел. Определяется по второму закону Ньютона:

$$F = ma;$$

$\dim F = \mathrm{LMT^{-2}}$, единица — ньютон (N; Н).

Ньютон равен силе, придающей телу массой 1 кг ускорение 1 $\mathrm{м/с^2}$ в направлении действия силы.

Момент силы M относительно некоторой точки — величина, равная произведению силы F на плечо h, т. е. на расстояние между направлением силы и этой точкой:

$$M = Fh;$$

$\dim M = \mathrm{L^2MT^{-2}}$, единица — ньютон-метр ($\mathrm{N \cdot m}$; $\mathrm{Н \cdot м}$).

Ньютон-метр равен моменту силы, равной 1 Н, относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы.

Импульс силы I — величина, равная произведению силы F на интервал времени, в течение которого сила действовала:

$$dI = Fdt;$$

$\dim I = \mathrm{LMT^{-1}}$, единица — ньютон-секунда ($\mathrm{N \cdot s}$; $\mathrm{Н \cdot с}$).

Ньютон-секунда равна импульсу силы, равной 1 Н и действующей в течение 1 с.

Давление p — величина, равная отношению силы dF, действующей на элемент поверхности нормально к ней, к площади dS этого элемента:

$$p = dF/dS;$$

$\dim p = \mathrm{L^{-1}MT^{-2}}$, единица — паскаль (Pa; Па).

Паскаль равен давлению, вызываемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 $\mathrm{м^2}$.

Примечание. В паскалях выражаются также нормальное и касательное напряжения, а также модули продольной упругости, сдвига и объемного сжатия.

Динамическая вязкость η является коэффициентом пропорциональности в формуле силы внутреннего трения:

$$F = \eta \frac{dv}{dl} \Delta S,$$

где dv/dl — градиент скорости; ΔS — площадь поверхности слоя, на которую рассчитывается сила внутреннего трения; dim $\eta = L^{-1}MT^{-1}$, единица — паскаль-секунда (Pa·s; Па·с).

Паскаль-секунда равна динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и при разности скоростей слоев, находящихся на расстоянии 1 м по нормали к направлению скорости 1 м/с, равно 1 Па.

Кинематическая вязкость ν — величина, равная отношению динамической вязкости среды к ее плотности:

$$\nu = \eta/\rho;$$

dim $\nu = L^2T^{-1}$, единица — квадратный метр на секунду (m^2/s; $м^2/с$).

Квадратный метр на секунду равен кинематической вязкости среды с динамической вязкостью 1 Па·с и плотностью 1 $кг/м^3$.

Поверхностное натяжение α жидкости — величина, равная отношению силы dF, действующей на участок контура свободной поверхности нормально к контуру и по касательной к поверхности, к длине dl этого участка:

$$\alpha = dF/dl;$$

dim $\alpha = MT^{-2}$, единица — ньютон на метр (N/m; Н/м).

Ньютон на метр равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой 1 Н, действующей на участок контура свободной поверхности длиной 1 м нормально к контуру и по касательной к поверхности.

Работа. Элементарной работой dA называют величину, равную скалярному произведению силы **F** на элементарное перемещение $d\mathbf{s}$:

$$dA = \mathbf{F}d\mathbf{s} = Fds\cos\alpha;$$

dim $A = L^2MT^{-2}$, единица — джоуль (J; Дж).

Джоуль равен работе силы 1 Н, перемещающей тело на расстояние 1 м в направлении действия силы.

Примечание. В джоулях выражаются также все виды энергии.

Мощность N, P — величина, равная отношению работы dA к бесконечно малому интервалу времени dt, в течение которого эта работа совершается:

$$N = dA/dt;$$

dim $N = L^2MT^{-3}$, единица — ватт (W; Вт).

Ватт равен мощности, при которой работа в 1 Дж производится за время 1 с.

ТЕПЛОТА

Температурный коэффициент α — величина, равная отношению относительного изменения dX/X_0 физической величины к изменению dT температуры от принятой за начальную:

$$\alpha = dX/(X_0 dT),$$

где X_0 — значение физической величины при температуре, принятой за начальную; dim $\alpha = \theta^{-1}$, единица — кельвин в минус первой степени (K^{-1}; $К^{-1}$);

Кельвин в минус первой степени равен температурному коэффициенту относительного изменения физической величины, при котором изменение температуры на 1 К от принятой за начальную вызывает относительное изменение этой величины, равное единице.

Температурный градиент grad T — векторная величина, численно равная изменению температуры на единице длины и направленная в сторону наиболее быстрого изменения температуры температурного поля; dim grad $T = L^{-1}\theta$, единица — кельвина на метр (K/m; К/м).

Кельвин на метр равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной 1 м в направлении градиента температура изменяется на 1 К.

Внутренняя энергия U системы — энергия хаотического теплового движения всех микрочастиц системы (молекул, атомов, ионов и т. п.) и энергия взаимодействия этих частиц.

Внутренняя энергия, как и любая другая энергии, имеет размерность работы: dim $U = L^2MT^{-2}$ и выражается в джоулях (J; Дж).

Теплота, количество теплоты Q — часть внутренней энергии, которая самопроизвольно, без внешнего воздействия переходит от тел более нагретых к телам менее нагретым посредством теплопроводности или лучеиспускания; dim $Q = L^2MT^{-2}$, единица — джоуль (J; Дж).

Джоуль равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж.

Примечание. В джоулях также выражаются термодинамический потенциал (энтальпия, изохорно-изотермический потенциал, изобарно-изотермический потенциал), теплота фазового превращения, теплота химической реакции.

Тепловой поток Φ через некоторую поверхность — величина, равная отношению количества теплоты dQ, прошедшей через эту поверхность, ко времени dt, за которое прошло это количество теплоты:

$$\Phi = dQ/dt.$$

Размерность теплового потока равна размерности мощности: dim $\Phi = L^2MT^{-3}$, единица — ватт (W, Вт).

Ватт равен тепловому потоку, эквивалентному механической мощности 1 Вт.

Поверхностная плотность теплового потока q — величина, равная отношению теплового потока $d\Phi$ к площади dS поверхности, через которую проходит этот поток:

$$q = d\Phi/dS;$$

dim $q = MT^{-3}$, единица — ватт на квадратный метр (W/m^2; $Вт/м^2$).

Ватт на квадратный метр равен поверхностной плотности теплового потока, при которой тепловой поток 1 Вт равномерно распределен по поверхности площадью 1 $м^2$.

Коэффициент теплопроводности λ — величина, равная плотности теплового потока, обусловленного теплопроводностью при градиенте температуры, равном единице. Входит в качестве коэффициента в формулу, определяющую количество теплоты, перенесенное за время t через поверхность площадью S в направлении нормали к этой поверхности:

$$Q = \lambda \frac{dT}{dx} St,$$

где dT/dx — градиент температуры; dim $\lambda = LMT^{-3}\theta^{-1}$, единица — ватт на метр-кельвин ($W/(m\cdot K)$; $Вт/(м\cdot К)$).

Ватт на метр-кельвин равен коэффициенту теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью теплового потока 1 $Вт/м^2$ устанавливается температурный градиент 1 К/м.

Теплоемкость C тела (системы) — величина, равная отношению количества теплоты dQ, необходимой для нагревания тела (системы тел), к разности температур dT тела:

$$C = dQ/dT;$$

dim $C = L^2MT^{-2}\theta^{-1}$, единица — джоуль на кельвин (J/K; Дж/К).

Джоуль на кельвин равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1 К при подведении к системе количества теплоты 1 Дж

Удельная теплоемкость c вещества — величина, равная отношению теплоемкости C однородного тела (системы) к его массе:

$$c = C/m;$$

dim $c = L^2T^{-2}\theta^{-1}$, единица — джоуль на килограмм-кельвин (J/(kg·K); Дж/(кг·К)).

Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе 1 кг теплоемкость 1 Дж/К.

Температуропроводность a — величина, характеризующая скорость выравнивания температуры при нестационарной теплопроводности и равная отношению коэффициента теплопроводности λ к объемной теплоемкости $c_p\rho$ вещества:

$$a = \lambda/(c_p\rho),$$

где c_p — удельная теплоемкость вещества при постоянном давлении; ρ — плотность вещества; dim $a = L^2T^{-1}$, единица — квадратный метр на секунду (m^2/s; $м^2/с$).

Квадратный метр на секунду равен температуропроводности вещества с коэффициентом теплопроводности 1 Вт/(м·К), удельной теплоемкостью при постоянном давлении 1 Дж/(кг·К) и плотностью 1 $кг/м^3$.

Удельная газовая постоянная B — величина, равная отношению работы dA, совершаемой идеальным газом при изобарном нагревании, к массе газа m и интервалу температур dT, на который газ нагревается:

$$B = dA/(m dT);$$

dim $B = L^2T^{-2}\theta^{-1}$, единица — джоуль на килограмм-кельвин (J/(kg·K); Дж/(кг·К)).

Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной газовой постоянной идеального газа массой 1 кг, совершающего при повышении температуры на 1 К при постоянном давлении работу 1 Дж.

Энтропия S системы — однозначная функция состояния системы, определяемая соотношением

$$dS = dQ/T,$$

где dQ — бесконечно малое количество теплоты, сообщенной системе при температуре T; dim $Q = L^2MT^{-2}\theta^{-1}$, единица — джоуль на кельвин (J/K; Дж/К).

Джоуль на кельвин равен изменению энтропии системы, которой при температуре nК в изотермическом процессе сообщается количество теплоты nДж.

Удельная энтропия s — величина, равная отношению энтропии dS к массе dm системы:

$$s = dS/dm;$$

dim $s = L^2T^{-2}\theta^{-1}$, единица — джоуль на килограмм-кельвин (J/(kg·K); Дж/(кг·К)).

Джоуль на килограмм-кельвин равен удельной энтропии вещества, в котором при массе 1 кг изменение энтропии составляет 1 Дж/К.

Удельное количество теплоты q — величина, равная отношению количества теплоты dQ, подводимого к системе или отводимого от нее в ходе процесса, к массе dm системы:

$$q = dQ/dm;$$

dim $q = L^2T^{-2}$, единица — джоуль на килограмм (J/kg; Дж/кг).

Джоуль на килограмм равен удельному количеству теплоты процесса, в ходе которого к веществу массой 1 кг подводится (или отводится от него) количество теплоты 1 Дж.

Примечание. В джоулях на килограмм выражаются также удельный термодиначеский потенциал, удельная теплота фазового превращения, удельная теплота химической реакции.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ*1

Количество электричества (электрический заряд) Q — величина, равная произведению силы тока I на время t, в течение которого шел ток:

$$Q = It;$$

dim $Q = TI$, единица — кулон (С; Кл).

Кулон равен количеству электричества, проходящему через поперечное сечение проводника при токе силой 1 А за время 1 с.

Пространственная плотность электрического заряда ρ — величина, равная отношению заряда dQ, находящегося в элементе пространства, к объему dV этого элемента:

$$\rho = dQ/dV;$$

dim $\rho = L^{-3}TI$, единица — кулон на кубический метр (C/m^3; $Кл/м^3$).

Кулон на кубический метр равен пространственной плотности электрического заряда, при которой в объеме 1 $м^3$ равномерно распределен заряд 1 Кл.

Поверхностная плотность электрического заряда σ — величина, равная отношению заряда dQ, находящегося на элементе поверхности, к площади dS этого элемента:

$$\sigma = dQ/dS;$$

dim $\sigma = L^{-2}TI$, единица — кулон на квадратный метр (C/m^2; $Кл/м^2$).

Кулон на квадратный метр равен поверхностной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по поверхности площадью 1 $м^2$, равен 1 Кл.

Линейная плотность электрического заряда τ — величина, равная отношению заряда dQ, находящегося на элементе линии, к длине dl этого элемента:

$$\tau = dQ/dl;$$

dim $\tau = L^{-1}TI$, единица — кулон на метр (C/m; Кл/м).

Кулон на метр равен линейной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по линии длиной 1 м, равен 1 Кл.

Электрическое напряжение U — величина, равная отношению мощности P постоянного тока к силе тока I:

$$U = P/I;$$

dim $U = L^2MT^{-3}I^{-1}$, единица — вольт (V; В).

Вольт равен электрическому напряжению, вызывающему в электрической цепи постоянный ток силой 1 А при мощности 1 Вт.

Примечание. В вольтах выражаются также электрический потенциал и разность потенциалов электрического поля, электродвижущая сила.

Напряженность электрического поля E — векторная величина, равная отношению силы dF, действующей на положительный заряд dQ, помещенный в некоторую точку электрического поля, к этому заряду:

$$E = dF/dQ;$$

dim $E = LMT^{-3}I^{-1}$, единица — вольт на метр (V/m; В/м).

---

*1 Электрические и магнитные единицы СИ следует образовывать в соответствии с рационализованной формой уравнений электромагнитного поля.

Вольт на метр равен напряженности однородного электрического поля, создаваемой разностью потенциалов 1 В между точками, находящимися на расстоянии 1 м на линии напряженности поля.

Поток электрического смещения Ψ сквозь замкнутую поверхность — величина, равная алгебраической сумме электрических зарядов, содержащихся во внутреннем пространстве этой поверхности:

$$\Psi = \sum_{i=1}^{n} Q_i;$$

dim $\Psi = \mathrm{TI}$, единица — кулон (С; Кл).

Кулон равен потоку электрического смещения, связанному с суммарным свободным зарядом 1 Кл.

Электрическое смещение D — величина, равная отношению потока электрического смещения $d\Psi$ к площади dS элемента поверхности, через которую этот поток проходит:

$$D = d\Psi/dS;$$

dim $D = \mathrm{L^{-2}TI}$, единица — кулон на квадратный метр (C/m²; Кл/м²).

Кулон на квадратный метр равен электрическому смещению, при котором поток электрического смещения сквозь поперечное сечение площадью 1 м² равен 1 Кл.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость ε_a, ε*1 среды является коэффициентом пропорциональности в формуле, связывающей между собой смещение и напряженность электрического поля:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_a \mathbf{E};$$

dim $\varepsilon_a = \mathrm{L^{-3}M^{-1}T^4I^2}$, единица — фарад на метр (F/m; Ф/м).

Фарад на метр равен абсолютной диэлектрической проницаемости среды, в которой напряженность электрического поля 1 В/м создает электрическое смещение 1 Кл/м².

Примечание. В фарадах на метр выражается также электрическая постоянная ε_0.

Электрический момент диполя p — векторная величина, равная произведению заряда Q диполя на его плечо l:

$$p = Ql;$$

dim $p = \mathrm{LTI}$, единица — кулон-метр (С·m; Кл·м).

Кулон-метр равен электрическому моменту диполя, заряды которого, равные каждый 1 Кл, расположены на расстоянии 1 м один от другого.

Плотность электрического тока j — величина, равная отношению силы тока dI к площади dS поперечного сечения:

$$j = dI/dS;$$

dim $j = \mathrm{L^{-2}I}$, единица — ампер на квадратный метр (A/m²; А/м²).

Ампер на квадратный метр равен плотности равномерно распределенного по поперечному сечению площадью 1 м² электрического тока силой 1 А.

Линейная плотность электрического тока A — величина, равная отношению силы тока dI в тонком листовом проводнике к ширине da этого проводника:

$$A = dI/da;$$

dim $A = \mathrm{L^{-1}I}$, единица — ампер на метр (A/m; А/м).

Ампер на метр равен линейной плотности электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по сечению тонкого листового проводника шириной 1 м, равна 1 А.

Электрическое сопротивление R — величина, характеризующая проводник и являющаяся коэффициентом пропорциональности в формуле, связывающей между собой напряжение U и силу тока I:

$$U = RI;$$

dim $R = \mathrm{L^2MT^{-3}I^{-2}}$, единица — Ом (Ω; Ом).

Ом равен сопротивлению проводника, между концами которого возникает напряжение 1 В при силе тока 1 А.

Электрическая проводимость G — величина, обратная сопротивлению:

$$G = 1/R;$$

dim $G = \mathrm{L^{-2}M^{-1}T^3I^2}$, единица — сименс (S; См).

Сименс равен электрической проводимости проводника сопротивлением 1 Ом.

Удельное электрическое сопротивление ρ вещества — величина, численно равная сопротивлению проводника длиной, равной единице длины, и площадью поперечного сечения, равной единице площади; dim $\rho = \mathrm{L^3MT^{-3}I^{-2}}$, единица — ом-метр (Ω·m; Ом·м).

Ом-метр равен удельному электрическому сопротивлению проводника площадью поперечного сечения 1 м² и длиной 1 м, имеющего сопротивление 1 Ом.

Удельная электрическая проводимость g вещества — величина, обратная удельному электрическому сопротивлению:

$$g = 1/\rho;$$

dim $g = \mathrm{L^{-3}M^{-1}T^3I^2}$, единица — сименс на метр (S/m; См/м).

Сименс на метр равен удельной электрической проводимости проводника, который при площади поперечного сечения 1 м² и длине 1 м имеет электрическую проводимость, равную 1 См.

Напряженность магнитного поля H — величина, характеризующая магнитное поле. Размерность и единица ее могут быть определены по формуле напряженности поля в центре длинного соленоида:

$$H = nI;$$

dim $H = \mathrm{L^{-1}I}$, единица — ампер на метр (A/m; А/м).

Ампер на метр равен напряженности магнитного поля в центре длинного соленоида с равномерно распределенной обмоткой, по которой проходит ток силой $1/h$ А, где n — число витков на участке соленоида длиной 1 м.

Магнитодвижущая сила F_m — величина, характеризующая намагничивающее действие электрического тока и равная циркуляции напряженности магнитного поля вдоль замкнутого контура:

$$F_m = \oint H_l dl;$$

dim $F_m = I$, единица — ампер (А; А).

Ампер равен магнитодвижущей силе вдоль замкнутого контура, сцепленного с контуром постоянного тока силой 1 А.

Примечание. В амперах выражается также разность магнитных потенциалов.

Магнитный поток. Единица и размерность магнитного потока Ф определяются по формуле

$$Q = \Phi/R,$$

где Q — количество электричества, проходящего в замк-

*1 Запасное обозначение (ε) обязательно в технической документации и литературе, специально предназначенной для отправки за границу.

нутом контуре при изменении до нуля магнитного потока Ф, сцепленного с этим контуром. Из этой формулы следует: dim $\Phi = L^2MT^{-2}I^{-1}$, единица — вебер (Wb; Вб).

Вебер равен магнитному потоку, при убывании которого до нуля в сцепленной с ним электрической цепи сопротивлением 1 Ом через поперечное сеченне проходит количество электричества 1 Кл.

Магнитная индукция B — величина, равная отношению магнитного потока $d\Phi$ к площади dS сечения, через которое проходит этот поток:

$$B = d\Phi/dS;$$

dim $B = MT^{-2}I^{-1}$, единица — тесла (T; Тл).

Тесла равна магнитной индукции, при которой через поперечное сечение площадью 1 м^2 проходит магнитный поток 1 Вб.

Индуктивность L — величина, характеризующая замкнутый контур и являющаяся коэффициентом пропорциональности между магнитным потоком, сцепленным с этим контуром, и силой тока в нем:

$$\Phi = LI;$$

dim $L = L^2MT^{-2}I^{-2}$, единица — генри (H; Гн).

Генри равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб.

Примечание. В генри выражается также взаимная индуктивность.

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a, μ*1 является коэффициентом пропорциональности между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля:

$$B = \mu_a H;$$

dim $\mu_a = LMT^{-2}I^2$, единица — генри на метр (H/m; Гн/м).

Генри на метр равен абсолютной магнитной проницаемости среды, в которой напряженность магнитного поля 1 А/м создает магнитную индукцию 1 Тл.

Примечание. В генри на метр выражается также магнитная постоянная μ_0.

Магнитный момент (амперовский) p_m контура с током — величина равная произведению силы тока I в контуре на площадь S, ограниченную им:

$$p_m = IS;$$

dim $p_m = L^2I$, единица — ампер-квадратный метр (A·m^2; А·м^2).

Ампер-квадратный метр равен магнитному моменту электрического тока силой 1 А, проходящего по контуру площадью 1 м^2.

Примечание. Размерность магнитного момента (кулоновского) dim $p_m = L^3MT^{-2}I^{-1}$, единица — вебер-метр (Wb·m; Вб·м).

Намагниченность (интенсивность намагничения) M — величина, равная отношению суммы магнитных моментов всех магнитных диполей, входящих в элемент магнетика, к объему dV этого элемента:

$$M = \sum_{i=1}^{N} p_{m,\,i}/dV,$$

где $p_{m,i}$ — магнитный момент i-го диполя; N — число диполей, входящих в элемент магнетика; dim $M = L^{-1}I$, единица — ампер на метр (A/m; А/м).

Ампер на метр равен намагниченности, при которой вещество объемом 1 м^3 имеет магнитный момент 1 А·м^2.

Магнитное сопротивление R_m — величина, являющаяся коэффициентом пропорциональности в формуле, выражающей зависимость магнитного потока Ф от магнитодвижущей силы F_m:

$$F_m = R_m\Phi;$$

dim $R_m = L^{-2}M^{-1}T^2I^2$, единица — генри в минус первой степени (H^{-1}; $Гн^{-1}$).

Генри в минус первой степени равен магнитному сопротивлению магнитной цепи, в которой магнитодвижущая сила 1 А создает магнитный поток 1 Вб.

Магнитная проводимость Λ — велнчина, обратная магнитному сопротнвлению:

$$\Lambda = 1/R_m;$$

dim $\Lambda_m = L^2MT^{-2}I^{-2}$, единица — генри (H; Гн).

Генри равен магнитной проводимостн магнитной цепи с магнитным сопротивлением 1 $Гн^{-1}$.

ОПТИКА

Энергетическая экспозиция H_e—величина, равная отношению энергии dW излучения, падающего на поверхность к площади dS этой поверхности:

$$H_e = dW/dS;$$

dim $H_e = MT^{-2}$, единица — джоуль на квадратный метр (J/m^2; Дж/м^2).

Джоуль на квадратный метр равен энергетической экспозицин, при которой на поверхность площадью 1 м^2 падает излученне с энергней 1 Дж.

Поток излучения Φ_e — величина, равная отношению энергии излучения ΔW, переносимой излучением, к времени Δt переноса, значительно превышающему период колебаний, т. е.

$$\Phi_e = \Delta W/\Delta t;$$

dim $\Phi_e = L^2MT^{-3}$, т. е. совпадает с размерностью мощности, единица — ватт (W; Вт).

Ватт равен потоку излучения, эквивалентному механической мощности 1 Вт.

Энергетическая светимость (излучательность) M_e — величина, равная отношению потока излучения $d\Phi_e$ к площади dS, с которой это излучение испускается:

$$M_e = d\Phi_e/dS;$$

dim $M_e = MT^{-3}$, единица — ватт на квадратный метр (W/m^2; Вт/м^2).

Ватт на квадратный метр равен энергетической светимости, при которой поверхность площадью 1 м^2 излучает поток излучения 1 Вт.

Облученность E_e — величина, равная отношению потока излучения $d\Phi_e$ к площади dS, которой это излучение поглощается:

$$E_e = d\Phi_e/dS;$$

dim $E_e = MT^{-3}$, единица — ватт на квадратный метр (W/m^2; Вт/м^2).

Ватт на квадратный метр равен облученности, при которой поверхность площадью 1 м^2 поглощает поток излучения 1 Вт.

Сила излучения I_e — величина, равная отношению потока излучения $d\Phi_e$ источника к телесному углу $d\Omega$, в пределах которого распространяется это излучение:

$$I_e = d\Phi_e/d\Omega;$$

dim $I_e = L^2MT^{-3}$, единица — ватт на стерадиан (W/sr; Вт/ср).

*1 Запасное обозначение (μ) обязательно в технической документацни и литературе, специально предназначенной для отправки за границу.

Ватт на стерадиан равен силе излучения света точечного источника, излучающего в телесном угле 1 ср поток излучения 1 Вт.

Энергетическая яркость B_e — величина, равная отношению энергетической силы света dI_e элемента излучающей поверхности к площади dS проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направленню наблюдения:

$$B_e = dI_e/dS;$$

dim $B_e = MT^{-3}$, единица — ватт на стерадиан-квадратный метр (W/(sr·m²); (Вт/(ср·м²)).

Ватт на стерадиан-квадратный метр равен энергетической яркости равномерно излучающей плоской поверхности площадью 1 м² в перпендикулярном к ней направлении при энергетической силе света 1 Вт/ср.

Световой поток Φ_v, испускаемый источнником света в некоторый телесный угол, — величина, равная произведению силы света I источника на этот телесный угол Ω;

$$\Phi_v = I\Omega;$$

dim $\Phi_v = J$, единица — люмен (lm, лм).

Люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд.

Световая энергия Q — велнчнна, равная произведению светового потока Φ_v на время t, в течение которого излучается (или воспрнннмается) этот световой поток:

$$Q = \Phi_v t;$$

dim $Q = TJ$, единица — люмен-секунда (lm·s; лм·с).

Люмен-секунда равна световой энергии светового потока в 1 лм, действующего в течение 1 с.

Яркость B_φ светящейся поверхности в некотором направлении φ — величина, равная отношению силы света I в этом иаправлении к площади S проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению:

$$B_\varphi = I/(S\cos\varphi);$$

dim $B = L^{-2}J$, единица — кандела на квадратный метр (kd/m²; кд/м²).

Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью 1 м² при силе света 1 кд.

Светимость R — величина, равная отношению светового потока $d\Phi_v$, нспускаемого светящейся поверхностью, к ее площади dS:

$$R = d\Phi_v/dS;$$

dim $R = L^{-2}J$, еднница — люмен на квадратный метр (lm/m²; лм/м²).

Люмен на квадратный метр равен светимостн поверхности площадью 1 м², испускающей световой поток 1 лм.

Освещенность E — величина, равная отношению светового потока $d\Phi_v$, падающего на элемент поверхности, к площади dS этого элемента:

$$E = d\Phi_v / dS;$$

dim $E = L^{-2}J$, единнца — люкс (lx; лк).

Люкс равен освещенности поверхности площадью 1 м² при падающем на нее световом потоке 1 лм.

Световая экспозиция H — величина, равная произведению освещениостн E на время t, в теченне которого происходит облучение:

$$H = Et;$$

dim $H = L^{-2}TJ$, еднница — люкс-секунда (lx·s; лк·с).

Люкс-секунда равна световой экспозиции, создаваемой за время 1 с при освещенностн 1 лк.

АКУСТИКА

Звуковое давление p — давление, дополнительно возннкающее в газообразной или жндкой среде при прохождении через нее звуковых волн. Звуковое давление, как и любое другое давленне, имеет размерность dim $p = L^{-1}MT^{-2}$ и выражается в паскалях (Pa; Па).

Колебательная скорость v — величина, равная произведению амплитуды A колебаний частиц среды, через которую проходит звук, на угловую частоту ω:

$$v = A\omega;$$

dim $v = LT^{-1}$, единица — метр в секунду (m/s; м/с).

Объемная скорость звука q — величина, равная произведенню колебательной скорости v на площадь S поперечного сеченнн канала, в котором распространяетси звук:

$$q = vS;$$

dim $q = L^3T^{-1}$, единица — кубический метр в секунду (м³/s; м³/с).

Кубический метр в секунду равен объемной скорости звука при колебательной скорости 1 м/с и плошади поперечного сечения канала 1 м².

Звуковая эиергия W — энергия частиц среды, в которой распространяется звук. Звуковая энергия, как и любая другая энергия, имеет размерность dim $W = L^2MT^{-2}$ и выражается в джоулях (J; Дж).

Плотность звуковой энергии — величина, равная отношению звуковой энергии dW, содержащейся в элементе канала, к объему dV этого элемента:

$$w = dW/dV;$$

dim $w = L^{-1}MT^{-2}$, единица — джоуль на кубический метр (J/m³; Дж/м³).

Джоуль на кубический метр равен плотности звуковой энергии в канале объемом 1 м³ прн звуковой энергии 1 Дж.

Поток звуковой энергии (звуковая мощность) P — величина, равная отношению звуковой энергии dW, проходящей через поверхность, к интервалу времени dt, за который эта энергия проходнт:

$$P = dW/dt;$$

dim $P = L^2MT^{-3}$, едииица — ватт (W; Вт).

Интенсивность звука I — величина, равная отношению потока dP звуковой энергин через поверхность, перпендикулярную направлению распространения звука, к площади dS этой поверхности:

$$I = dP/dS;$$

dim $I = MT^{-3}$, единица — ватт на квадратный метр (W/m², Вт/м²).

Ватт на квадратный метр равен интенсивности звука в канале при потоке звуковой энергии 1 Вт и площади поперечного сечения 1 м².

Акустическое сопротивление Z_a канала является коэффициентом пропорциональности в равенстве, связывающем между собой амплитуду p_0 звукового давления и объемную скорость q звука:

$$p_0 = Z_a q;$$

dim $Z_a = L^{-4}MT^{-1}$, еднница — паскаль секунда на кубическнй метр (Pa·s/m³; Па·с/м³).

Паскаль-секунда на кубический метр равна акустическому сопротивлению канала, в котором создается объемная скорость 1 м³/с при звуковом давлении 1 Па.

Удельное акустическое сопротивление Z_s — величина, равная произведению акустического сопротивления на площадь S поперечного сечения канала:

$$Z_S = Z_a S;$$

dim $Z_S = L^{-2}MT^{-1}$, единица — паскаль-секунда на метр (Pa·s/m; Па·с/м).

Паскаль-секунда на метр равна удельному акустическому сопротивлению канала площадью поперечного сечения 1 м², имеющего акустическое сопротивление 1 Па·с/м².

Механическое сопротивление Z_m — величина, равная отношению силы F, действующей на поперечное сечение канала, в котором распространяется звук, к средней колебательной скорости $\langle v \rangle$ в этом сечении:

$$Z_m = F/\langle v \rangle;$$

dim $Z_m = MT^{-1}$, единица — ньютон-секунда на метр (N·s/m; Н·с/м).

Ньютон-секунда на метр равна механическому сопротивлению канала, в котором при силе 1 Н возникает колебательная скорость 1 м/с.

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Молярная масса M — велнчина, равная отношению массы m системы (тела) к колнчеству вещества n системы:

$$M = m/n;$$

dim $M = MN^{-1}$, единица — килограмм на моль (kq/mol; кг/моль).

Килограмм на моль равен молярной массе вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль массу 1 кг.

Молярный объем V_m — величина, равная отношению объема V системы (тела) к ее колнчеству вещества n:

$$V_m = V/n;$$

dim $V_m = L^3N^{-1}$, единица — кубнческий метр на моль (m³/mol; м³/моль).

Кубический метр на моль равен молярному объему вещества, занимающего при количестве вещества 1 моль объем 1 м³.

Молярная внутренняя энергия U_m — величина, равная отношению внутренней энергин dU системы (тела) к ее количеству вещества dn:

$$U_m = dU/dn;$$

dim $U_m = L^2MT^{-2}N^{-1}$, единица — джоуль на моль (J/mol; Дж/моль).

Джоуль на моль равен молярной внутренней энергии вещества в количестве 1 моль, внутренняя энергия которого равна 1 Дж.

Примечание. В джоулях на моль выражаются также молярная энтальпия, химический потенциал, химическое сродство, энергия актнвации.

Молярная теплоемкость C — величина, равная отношению теплоемкости системы (тела) к ее количеству вещества:

$$C_m = C/n;$$

dim $C_m = L^2MT^{-2}\Theta^{-1}N^{-1}$, единица — джоуль на моль-кельвин (J/(mol·K); Дж/(моль·К)).

Джоуль на моль-кельвин равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль теплоемкость 1 Дж/К.

Примечание. В джоулях на моль-кельвин выражается также молярная энтропия.

Концентрация молекул n однородной системы — величина, равная отношеиию числа dN молекул системы к ее объему dV:

$$n = dN/dV;$$

dim $n = L^{-3}$, единица — метр в минус третьей степени (m⁻³, м⁻³).

Метр в минус третьей степени равен концентрации молекул, при которой в элементе системы объемом 1 м³ содержится одна молекула.

Молярная концентрация вещества B в смеси (растворе, сплаве) — отношение количества вещества dn к объему dV смеси (раствора, сплава):

$$C_B = dn_B/dV;$$

dim $C_B = L^{-3}N$, единица — моль на кубический метр (mol/m³ моль/м³).

Моль на кубический метр равен молярной концентрации вещества в растворе, при которой в объеме раствора 1 м³ содержится количество растворенного вещества, равное 1 моль.

Примечание. Ранее дли этой величины применяли термин «молярность», который теперь исключен из международных рекомендаций по терминологии физической химии.

Моляльность b_B раствора компонента — отношение количества вещества dn растворенного компонента к массе dm растворнтеля:

$$b_B = dn/dm;$$

dim $b_B = M^{-1}N$, единица — моль на килограмм (mol/kg; моль/кг).

Моль на килограмм равен моляльности раствора, при которой на массу растворителя 1 кг приходится количество вещества, равное 1 моль.

Примечание. В молях на килограмм выражается также удельная адсорбция.

Массовая концентрация компонента B в смеси (растворе, сплаве) — величина, равная отношению массы dm компонента B к объему dV смеси (раствора, сплава):

$$\rho_B = dm_B/dV;$$

dim $\rho_B = L^{-3}M$, единица — килограмм на кубический метр (kg/m³; кг/м³).

Килограмм на кубический метр равен массовой концентрацни компонента, при которой в объеме смеси (раствора, сплава) 1 м³ содержится компонент массой 1 кг.

Скорость химической реакции v — велнчнна, равная отношению изменения ΔC_B молярной концентрации исходного вещества в растворе к времени Δt реакции:

$$v = \Delta C_B/\Delta t;$$

dim $v = L^{-3}T^{-1}N$, единица — моль в секунду на кубический метр (mol/(s·m³); моль/(с·м³)).

Моль в секунду на кубический метр равен средней скорости одномолекулярной химической реакции, при которой за время 1 с молярная концентрация исходного вещества в растворе изменяется на 1 моль/м³.

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Масса покоя частицы, атома, ядра m; dim $m = M$, единица — килограмм (kg; кг).

Дефект массы Δm; *dim* $\Delta m = M$, единица — килограмм (kg; кг).

Элементарный заряд e; dim $e = TI$, единица — кулон (C; Кл).

Магнитный момент атома, ядра μ; dim $\mu = L^2I$, единица — ампер-квадратный метр (A·m²; А·м²).

Магнетон ядерный μ_N; dim $\mu_N = L^2I$, единица — ампер-квадратный метр (А·м²; A·м²).

Гиромагнитное отношение γ; dim $\gamma = M^{-1}TI$, единица — ампер-квадратный метр на джоуль-секунду (А·м²/(Дж·с); A·м²/(Дж·с)).

Ядерный квадрупольный момент Q; dim $Q = L^2$, единица — квадратный метр (м²; м²).

Силовая постоянная колебательного спектра молекулы — размерность MT^{-2}, единица — ньютон на метр (N/m; Н/м).

Энергия связи $E_{св}$; dim $E_{св} = L^2MT^{-2}$, единица — джоуль (J; Дж).

Ширина уровня Γ; dim $\Gamma = L^2MT^{-2}$, единица — джоуль (J, Дж).

Переиос (флюенс) частиц — размерность L^{-2}, единица — метр в минус второй степени (m^{-2}, $м^{-2}$).

Плотность потока частиц φ; dim $\varphi = L^{-2}T^{-1}$, единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степенн ($s^{-1}\cdot m^{-2}$; $с^{-1}\cdot м^{-2}$).

Перенос (флюенс) энергии — размерность MT^{-2}, единица — джоуль на квадратиый метр (Дж·м⁻², Дж · м⁻²).

Эффективное сечение σ; dim $\sigma = L^2$, единица — квадратный метр (m^2; $м^2$).

Дифференциальное эффективное сечение $d\sigma/d\Omega$; dim $(d\sigma/d\Omega) = L^2$, единица — квадратный метр на стерадиан (m^2/sr;м²/ср).

Спектральное эффективное сечение — размерность $M^{-1}T^2$, единица — квадратный метр на джоуль (m^2/J; м²/Дж).

Линейиый коэффициент ослабления μ_l; dim $\mu_l = L^{-1}$, единица — метр в минус первой степени (m^{-1}; $м^{-1}$).

Атомный коэффициент ослабления μ_a; dim $\mu_a = L^2$, единица — квадратный метр (m^2; $м^2$).

Массовый коэффициент ослабления μ_m; dim $\mu_m = L^2M^{-1}$, единица — квадратный метр на килограмм (m^2/kg; м²/кг).

Массовый коэффициент преобразования энергии — размерность L^2M^{-1}, единица — квадратный метр на килограмм (m^2/kg; м²/кг).

Массовый коэффициент поглощения — размерность L^2M^{-1}, единица — квадратный метр на килограмм (m^2/kg; м²/кг).

Длина среднего пробега $\cdot\langle l\rangle$ dim $\langle l\rangle = L$, единица — метр (m; м).

Средний массовый пробег — размерность $L^{-2}M$, единица — килограмм на квадратный метр (kg/m²; кг/м²).

Линейная плотность ионизации — размерность L^{-1}, единица — метр в минус первой степени (m^{-1}; $м^{-1}$).

Толщина слоя половинного ослабления $d_{1/2}$; dim $d_{1/2} = L$, **единица** — метр (m; м).

Тормозной эквивалент — размерность L, длина — метр (m; м).

Тормозная способность (линейная) — размерность LMT^{-2}, единица — джоуль на метр (J/m; Дж/м).

Линейное преобразование энергии — размерность LMT^{-2}, единица — джоуль на метр (J/m; Дж/м).

Средияя энергия ионообразования — размерность L^2MT^{-2}, единица — джоуль (J; Дж).

Атомная тормозная способность — размерность L^4MT^{-2}, единица — джоуль-квадратный метр (J·m²; Дж·м²).

Массовая тормозная способность — размерность L^4T^{-2}, единица — джоуль-квадратный метр на килограмм (J·m²/kg; Дж·м²/кг).

Подвижность b; dim $b = M^{-1}T^2I$, единица — квадратный метр на вольт-секунду (m²/(V·s); м²/(В·с))

Потока нейтронов Φ; dim $\Phi = T^{-1}$, единица — секунда в минус первой степени (s^{-1}; $с^{-1}$).

Концентрация ионов, нейтронов n; dim $n = L^{-3}$, единица — метр в минус третьей степени (m^{-3}; $м^{-3}$).

Объемная скорость нейтронов — размерность $L^{-3}T^{-1}$, единица — секунда в минус первой степенн-метр в мииус третьей степени ($s^{-1}\cdot m^{-3}$; $с^{-1}\cdot м^{-3}$).

Плотность замедления — размерность $L^{-3}T^{-1}$, единица — секунда в минус первой степени-метр в минус третьей степени ($s^{-1}\cdot m^{-3}$; $с^{-1}\cdot м^{-3}$).

Замедляющая способность среды — размерность L^{-1}, единица — метр в минус первой степени (m^{-1}; $м^{-1}$).

Коэффициент диффузии для плотности потока нейтронов — размерность L, единица — метр (m; м).

Возраст нейтрона — размерность L^2, единица — квадратный метр (m^2; $м^2$).

1.3. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Величины и единицы, характеризующие ионизирующее излучение и его поле

Энергия ионизирующих частиц E; dim $E = L^2MT^{-2}$, единица — джоуль (J; Дж).

Предпочтительные единицы: эВ; кэВ; МэВ; ГэВ.

Энергия ионизирующего излучения w — суммарная энергия ионизирующих частиц (без учета энергии покоя), испущенная, переданная или поглощенная; dim $w = L^2MT^{-2}$, единица — джоуль (J; Дж).

Предпочтительные единицы: фДж; пДж; нДж; мкДж; мДж; Дж; кДж; МДж.

Масса покоя частицы, атома, атомного ядра m_a; dim $m_a = M$, единица — килограмм (kg; кг).

Предпочтительная единица: атомная единица массы (а.е.м.).

Поток ионизирующих частиц F — отношение числа ионизирующих частнц dN, проходящих через данную поверхность за интервал времени dt, к этому интервалу:

$$F = dN/dt;$$

dim $F = T^{-1}$, единица — секунда в минус первой степени (s^{-1}; $с^{-1}$).

Секунда в минус первой степени равна потоку ионизирующих частнц, прн котором через данную поверхность за 1 с проходнт одна частнца.

Предпочтительные единицы: $с^{-1}$; $мин^{-1}$.

Перенос (флюенс) ионизирующих частиц Φ — отношенне числа ионизирующих частнц dN, проникающих в элементарную сферу, к площади dS центрального сечення этой сферы:

$$\Phi = dN/dS;$$

dim $\Phi = L^{-2}$, единица — метр в мннус второй степени (m^{-2}; $м^{-2}$).

Метр в минус второй степени равен переносу **(флюенсу)** ионизирующих частиц, при котором в сферу с площадью центрального сечения 1 м² проникает одна частица.

Предпочтительная единица: $см^{-2}$.

Плотность потока ионизирующих частиц φ — отношение потока ионизирующнх частиц dF, проникающих в элементарную сферу, к площади dS центрального сечения этой сферы:

$$\varphi = dF/dS = d\Phi/dt = d^2N/(dS\cdot dt);$$

dim $\varphi = L^{2-}T^{-1}$, единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степенн ($s^{-1}\cdot m^{-2}$; $с^{-1}\cdot м^{-2}$).

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени равен плотности потока ионизирующих частиц, при которой в сферу с площадью центрального сечения 1 м² за 1 с проникает одна частица.

Предпочтительные единицы: $с^{-1}\cdot см^{-2}$; $мин^{-1}\cdot см^{-2}$.

Энергетическая **плотность потока ионизирующих частиц** $\varphi(E)$ — отношение плотности потока ионизирующих частиц φ с энергией от E до $E+dE$ к энергетическому интервалу dE:

$$\varphi(E) = d\varphi/dE = d^2F/(dS \cdot dE) = d^2\Phi/(dt \cdot dE) = d^3N/(dS \cdot dt \cdot dE);$$

$\dim \varphi(E) = L^{-4}M^{-1}T$, единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени ($s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot J^{-1}$; $с^{-1} \cdot м^{-2} \cdot Дж^{-1}$).

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени равен энергетической плотности потока ионизирующих частиц, при которой в сферу с площадью центрального сечения 1 м^2 за 1 с проникает одна частица с энергией, заключенной в энергетическом интервале 1 Дж.

Предпочтительные единицы: $с^{-1} \cdot см^{-2} \times эВ^{-1}$; $с^{-1} \cdot см^{-2} \cdot кэВ^{-1}$; $с^{-1} \cdot см^{-2} \cdot МэВ^{-1}$.

Угловая плотность потока ионизирующих частиц $\varphi(\Omega)$ — отношение плотности потока ионизирующих частиц $d\varphi$, распространяющихся в пределах элементарного телесного угла $d\Omega$, ориентированного в направлении Ω, к этому телесному углу:

$$\varphi(\Omega) = d\varphi/d\Omega = d^2\Phi/(dt \cdot d\Omega) = d^2F/(dS \cdot d\Omega) = d^3N/(dS \cdot dt \cdot d\Omega);$$

$\dim \varphi(\Omega) = L^2T^{-1}$, единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-стерадиан в минус первой степени ($s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$; $с^{-1} \cdot м^{-2} \cdot ср^{-1}$).

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-стерадиан в минус первой степени равен угловой плотности потока ионизирующих частиц, при которой поверхность площадью 1 м^2, перпендикулярную направлению движения частицы, за 1 с пересекает одна ионизирующая частица, движущаяся в телесном угле 1 ср.

Предпочтительная единица: $с^{-1} \cdot см^{-2} \times ср^{-1}$.

Энергетическо-угловая плотность потока ионизирующих частиц $\varphi(E, \Omega)$ — отношение плотности потока φ ионизирующих частиц с энергией от E до $E+dE$, распространяющихся в пределах элементарного телесного угла $d\Omega$, ориентированного в направлении Ω к энергетическому интервалу dE и этому телесному углу:

$$\varphi(E, \Omega) = \frac{d^2\varphi}{dE \cdot d\Omega} = \frac{d^3F}{dS \cdot dE \cdot d\Omega} = \frac{d^3\Phi}{dt \cdot dE \cdot d\Omega} = \frac{d^4N}{dS \cdot dt \cdot dE \cdot d\Omega};$$

$\dim (E, \Omega) = L^{-4}M^{-1}T$, единица — секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени-стерадиан в минус первой степени ($s^{-1} \times m^{-2} \cdot J^{-1} \cdot sr^{-1}$; $с^{-1} \cdot м^{-2} \cdot Дж^{-1} \cdot ср^{-1}$).

Секунда в минус первой степени-метр в минус второй степени-джоуль в минус первой степени-стерадиан в минус первой степени равен энергетическо-угловой плотности потока ионизирующих частиц, при которой поверхность площадью 1 м^2, перпендикулярную направлению движения частицы, за 1 с пересекает одна ионизирующая частица с энергией, заключенной в энергетическом интервале 1 Дж, движущаяся в телесном угле 1 ср.

Предпочтительные единицы: $с^{-1} \cdot см^{-2} \times эВ^{-1} \cdot ср^{-1}$; $с^{-1} \cdot см^{-2} \cdot кэВ^{-1} \cdot ср^{-1}$; $с^{-1} \cdot см^{-2} \cdot МэВ^{-1} \cdot ср^{-1}$.

Поток энергии ионизирующего излучения F_w — отношение энергии ионизирующего излучения dw, проходящего через данную поверхность за интервал времени dt, к этому интервалу:

$$F_w = dw/dt;$$

$\dim F_w = L^2MT^{-3}$, единица — ватт (W, Вт).

Ватт равен потоку энергии ионизирующего излучения, при котором через данную поверхность за 1 с проходит излучение с энергией 1 Дж.

Предпочтительные единицы: нВТ; мкВт; мВт; Вт; кВт; МВт.

Перенос (флюенс) энергии ионизирующего излучения Φ_w — отношение энергии ионизирующего излучения dw, проникающего в элементарную сферу, к площади dS центрального сечения этой сферы:

$$\Phi_w = \frac{dw}{dS};$$

$\dim \Phi_w = MT^{-2}$, единица — джоуль на квадратный метр (J/m^2; Дж/м^2).

Джоуль на квадратный метр равен переносу (флюенсу) энергии ионизирующего излучения, при котором в сферу с площадью центрального сечения 1 м^2 проникает излучение с энергией 1 Дж.

Предпочтительные единицы: фДж/см^2; пДж/см^2; нДж/см^2; мкДж/см^2; мДж/см^2; Дж/см^2; кДж/см^2; МДж/см^2.

Плотность потока энергии ионизирующего излучения φ_w — отношение потока энергии ионизирующего излучения dF_w, проникающего в элементарную сферу, к площади dS центрального сечения этой сферы:

$$\varphi_w = \frac{dF_w}{dS} = \frac{d\Phi_w}{dt} = \frac{d^2w}{dS \cdot dt};$$

$\dim \varphi_w = MT^{-3}$, единица — ватт на квадратный метр (W/m^2; Вт/м^2).

Ватт на квадратный метр равен плотности потока энергии ионизирующего излучения, при которой в сферу с площадью центрального сечения 1 м^2 за 1 с проникает излучение с энергией 1 Дж.

Предпочтительные единицы: нВт/см^2; мкВт/см^2; мВт/см^2; Вт/см^2; кВт/см^2; МВт/см^2.

Величины и единицы, характеризующие взаимодействие ионизирующего излучения с веществом

Сечение взаимодействия ионизирующих частиц (сечение взаимодействия) σ_i — отношение числа n_i определенного (i-го) типа взаимодействий ионизирующих частиц и частиц-мишеней в элементарном объеме при переносе Φ ионизирующих частиц к числу N частиц-мишеней в этом объеме и к этому переносу:

$$\sigma_i = \frac{n_i}{\Phi N};$$

$\dim \sigma_i = L^2$, единица — квадратный метр (m^2; м^2).

Квадратный метр равен сечению взаимодействия ионизирующих частиц, при котором в веществе, содержащем одну частицу-мишень в 1 м^3, перенос падающих частиц 1 м$^{-2}$ приводит в среднем к одному акту взаимодействия определенного типа в 1 м^3.

Предпочтительная единица: фм^2.

Полное сечение взаимодействия ионизирующих частиц (полное сечение взаимодействия) σ — сумма всех сечений взаимодействия σ_i ионизирующих частиц данного вида, соответствующих различным реакциям или процессам:

$$\sigma = \sum_i \sigma_i;$$

dim $\sigma = L^2$, единица — квадратный метр ($м^2$; $м^2$).

Квадратный метр равен полному сечению взаимодействия ионизирующих частиц, при котором в веществе, содержащем одну частицу-мишень в 1 $м^3$, перенос падающих частиц 1 $м^{-2}$ приводит в среднем к одному акту взаимодействия в 1 $м^3$.

Предпочтительная единица: $фм^2$.

Макроскопическое сечение взаимодействия ионизирующих частиц (макроскопическое сечение взанмодействия) Σ_i — произведение сечения взаимодействия σ_i на концентрацию C частиц-мишеней в веществе:

$$\Sigma_i = \sigma_i C;$$

dim $\Sigma_i = L^{-1}$, единица — метр в минус первой степени ($м^{-1}$; $м^{-1}$).

Предпочтительная единица: $см^{-1}$.

Линейный коэффициент ослабления μ — отношение доли dN/N косвенно ионизирующих частиц, испытавших взаимодействие при прохождении элементарного пути dl в веществе, к длине этого пути:

$$\mu = \frac{1}{N}\,\frac{dN}{dl};$$

dim $\mu = L^{-1}$, единица — метр в минус первой степени ($м^{-1}$; $м^{-1}$).

Метр в минус первой степени равен линейному коэффициенту ослабления, при котором на пути 1 м плотность потока в параллельном пучке косвенно ионизирующих частиц уменьшается в е раз (е — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица: $см^{-1}$.

Массовый коэффициент ослабления μ_m — отношение линейного коэффициента ослабления μ к плотности ρ вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho N}\,\frac{dN}{dl};$$

dim $\mu_m = L^2M^{-1}$, единица — квадратный метр на килограмм ($м^2$/kg; $м^2$/кг).

Квадратный метр на килограмм равен массовому коэффициенту ослабления, при котором на пути в 1 м в веществе с плотностью 1 $кг/м^3$ плотность потока в параллельном пучке косвенно ионизирующих частиц уменьшается в е раз (е — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица: $см^2$/г.

Атомный коэффициент ослабления μ_a — отношение линейного коэффициента ослабления μ к концентрации C атомов вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_a = \frac{\mu}{C} = \frac{1}{CN}\,\frac{dN}{dl};$$

dim $\mu_a = L^2$, единица — квадратный метр ($м^2$; $м^2$).

Предпочтительная единица: $см^2$.

Линейный коэффициент передачи энергии μ_{tr} — отношение доли энергии dw/w косвенно ионизирующего излучения (исключая энергию покоя частиц), которая преобразуется в кинетическую энергию заряженных частиц при прохождении элементарного пути dl в веществе, к длине этого пути:

$$\mu_{tr} = \frac{1}{w}\,\frac{dw}{dl};$$

dim $\mu_{tr} = L^{-1}$, единица — метр в минус первой степени ($м^{-1}$; $м^{-1}$).

Метр в минус первой степени равен линейному коэффициенту передачи энергии, при котором в веществе на пути 1 м плотность потока энергии косвенно ионизирующего излучения уменьшается в е раз (е — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица: $см^{-1}$.

Массовый коэффициент передачи энергии $\mu_{tr,m}$ — отношение линейного коэффициента передачи энергии μ_{tr} к плотности ρ вещества, через которое проходит косвенно нонизирующее нзлучение:

$$\mu_{tr,\,m} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho w}\,\frac{dw}{dl};$$

dim $\mu_{tr,m} = L^2M^{-1}$, единица — квадратный метр на килограмм ($м^2$/kg; $м^2$/кг).

Квадратный метр на килограмм равен массовому коэффициенту передачи энергии, при котором на пути 1 м в веществе с плотностью 1 $кг/м^3$ плотность потока энергин косвенно ионизирующего излучения уменьшает в е раз (е — основание натурального логарифма).

Предпочтительная единица: $см^2$/г.

Линейный коэффициент поглощения энергии μ_{en} — произведение линейного коэффициента передачи энергии μ_{tr} на разность между единицей и долей g энергии вторичных заряженных частиц, переходящей в тормозное излучение в данном веществе:

$$\mu_{en} = \mu_{tr}(1 - g);$$

dim $\mu_{en} = L^{-1}$, единица — метр в минус первой степени ($м^{-1}$; $м^{-1}$).

Предпочтительная единица: $см^{-1}$.

Массовый коэффициент поглощения энергии $\mu_{en,m}$ — отношение линейного коэффициента поглощения энергии μ_{en} к плотности ρ вещества, через которое проходит косвенно ионизирующее излучение:

$$\mu_{en,\,m} = \frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}(1-g)}{\rho} = \mu_{tr,\,m}(1-g);$$

dim $\mu_{en,m} = L^2M^{-1}$, единица — квадратный метр на килограмм ($м^2$/kg; $м^2$/кг).

Предпочтительная единица: $см^2$/г.

Средний линейный пробег заряженной ионизующей частицы R — среднее значение модуля вектора между началом и концом пробега заряженной ионизующей частицы в данном веществе; dim $R = L$, единица — метр (m; м).

Предпочтительные единицы: мкм; мм; см; м.

Средний массовый пробег заряженной ионизующей частицы R_m — произведение среднего линейного пробега R заряженной ионизующей частицы в данном веществе на плотность ρ этого вещества:

$$R_m = R\rho;$$

dim $R_m = ML^{-2}$, единица — килограмм на квадратный метр (kg/$м^2$; кг/$м^2$).

Предпочтительная единица: г/$см^2$.

Линейная плотность ионизации i — отношение числа dn ионов одного знака, образованных заряженной ионизующей частицей на элементарном пути dl, к этому пути:

$$i = dn/dl;$$

dim $i = L^{-1}$, единица — метр в минус первой степени ($м^{-1}$; $м^{-1}$).

Предпочтительные единицы: $см^{-1}$; $мкм^{-1}$.

Линейная тормозная способность вещества S — отношение энергии dE, теряемой заряженной ионизующей частицей при прохождении элементарного пути dl в ве-

ществе, к длине этого пути:

$$S = dE/dl;$$

dim $S = LMT^{-2}$, единица — джоуль на метр (J/m; Дж/м).

Предпочтительная единица: кэВ/мкм.

Массовая тормозная способность вещества S_m — отношение линейной тормозной способности S вещества к плотности ρ вещества:

$$S_m = \frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho}\frac{dE}{dl};$$

dim $S_m = L^4T^{-2}$, единица — джоуль-метр в квадрате на килограмм (J·m²/kg; Дж·м²/кг).

Предпочтительные единицы: кэВ·см²/г; МэВ·см²/г.

Атомная тормозная способность вещества S_a — отношение линейной тормозной способности S вещества к концентрации C атомов этого вещества:

$$S_a = \frac{S}{C} = \frac{1}{C}\frac{dE}{dl};$$

dim $S_a = L^4MT^{-2}$, единица — джоуль-квадратный метр (J·m²; Дж·м²).

Предпочтительная единица: эВ·см².

Линейная передача энергии (ЛПЭ) L_Δ — отношение энергии dE_Δ, переданной веществу заряженной частицей вследствие столкновений на элементарном пути dl, к длине этого пути:

$$L_\Delta = dE_\Delta / dl;$$

dim $L_\Delta = LMT^{-2}$, единица — джоуль на метр (J/m; Дж/м).

Предпочтительная единица: кэВ/мкм.

Средняя энергия ионообразования W — отношение начальной кинетической энергии E заряженной ионизующей частицы к среднему числу пар ионов N, образованных этой частицей до полной потери ее кинетической энергии в данном веществе:

$$W = E/N;$$

dim $W = L^2MT^{-2}$, единица — джоуль (J; Дж).

Предпочтительная единица: эВ.

Массовая поверхностная плотность ρ_s — отношение массы dm вещества элемента слоя с площадью dS поверхности к этой площади:

$$\rho_S = dm/dS;$$

dim $\rho_s = ML^{-2}$, единица — килограмм на квадратный метр (kg/m²; кг/м²).

Килограмм на квадратный метр равен массовой поверхностной плотности, при которой на 1 м² поверхности слоя равномерно распределена масса 1 кг.

Предпочтительные единицы: мг/см²; г/см².

Дозиметрические величины и единицы

Поглощенная доза ионизирующего излучения (доза излучения) D — отношение средней энергии dw, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе dm вещества в этом объеме:

$$D = dm/dw;$$

dim $D = L^2T^{-2}$, единица — грэй (Gy; Гр).

Грэй равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж.

Предпочтительные единицы: нГр; мкГр; мГр; Гр; кГр; МГр.

Мощность поглощенной дозы ионизирующего излучения (мощность дозы излучения) $\dot{D}$ — отношение приращения поглощенной дозы dD за интервал времени dt к этому интервалу времени:

$$\dot{D} = dD/dt;$$

dim $\dot{D} = L^2T^{-3}$, единица — грэй в секунду (Gy/s; Гр/с).

Грэй в секунду равен мощности поглощения дозы излучений, при которой за 1 с в веществе создается доза излучения 1 Гр.

Предпочтительные единицы: мГр/мин; Гр/мин; мГр/с; Гр/с; кГр/с.

Керма K — отношение суммы начальных кинетических энергий $dE_к$ всех заряженных ионизирующих частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе dm вещества в этом объеме:

$$K = dE_к/dm;$$

dim $K = L^2T^{-2}$, единица — грэй (Gy; Гр).

Грэй равен керме, при которой сумма начальных кинетических энергий всех заряженных ионизующих частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в веществе массой 1 кг, равна 1 Дж.

Предпочтительные единицы: нГр; мкГр; мГр; Гр; кГр; МГр.

Мощность кермы $\dot{K}$ — отношение приращения кермы dK за интервал времени dt к этому интервалу времени:

$$\dot{K} = dK/dt;$$

dim $\dot{K} = L^2T^{-3}$, единица — грэй в секунду (Gy/s; Гр/с).

Грэй в секунду равен мощности кермы, при которой в веществе за 1 с создается керма 1 Гр.

Предпочтительные единицы: мГр/мин; Гр/мин; мГр/с; Гр/с; кГр/с.

Экспозиционная доза фотонного излучения (экспозиционная доза) X — отношение суммарного заряда dQ всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой dm, полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме:

$$X = dQ/dm;$$

dim $X = M^{-1}TI$, единица — кулон на килограмм (C/kg; Кл/кг).

Кулон на килограмм равен экспозиционной дозе, при которой все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в воздухе массой 1 кг, производят ионы, несущие электрический заряд 1 Кл каждого знака.

Мощность экспозиционной дозы фотонного излучения (мощность экспозиционной дозы) $\dot{X}$ — отношение приращения экспозиционной дозы dX за интервал времени dt к этому интервалу времени:

$$\dot{X} = dX/dt;$$

dim $\dot{X} = M^{-1}I$, единица — ампер на килограмм (A/kg; А/кг).

Ампер на килограмм равен мощности экспозиционной дозы фотонного излучения, при которой за 1 с создается экспозиционная доза 1 Кл/кг.

Примечание. В процессе перехода на единицы СИ физические величины экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы подлежат изъятию из употребления.

Эквивалентная доза ионизирующего излучения (эквивалентная доза) H — произведение поглощенной дозы D на средний коэффициент качества k ионизирующего излу-

чения в данном элементе объема биологической ткани стандартного состава:

$$H = Dk;$$

dim $H = L^2T^{-2}$, единица — зиверт (Sv; Зв).

Зиверт равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 1 Дж/кг.

Предпочтительные единицы: мкЗв; мЗв.

Мощность эквивалентной дозы ионизирующего излучения (мощность эквивалентной дозы) $\dot{H}$ — отношение приращения dH эквивалентной дозы за интервал времени dt к этому интервалу времени:

$$\dot{H} = dH/dt;$$

dim $\dot{H} = L^2T^{-3}$, единица — зиверт в секунду (Sv/s; Зв/с).

Зиверт в секунду равен мощности эквивалентной дозы, при которой за 1 с создается эквивалентная доза 1 Зв.

Предпочтительная единица: мкЗв/ч.

Величины и единицы, характеризующие источники ионизирующих излучений

Активность радионуклида в источнике (образце) (активность радионуклида) A — отношение числа dN спонтанных переходов из определенного ядерно-энергетического состояния радионуклида, происходящих в источнике (образце) за интервал времени dt, к этому интервалу времени:

$$A = dN/dt;$$

dim $A = T^{-1}$, единица — беккерель (Bq; Бк).

Беккерель равен активности нуклида в радиоактивном источнике, в котором за время 1 с происходит один спонтанный переход из определенного ядерно-энергетического состояния этого радионуклида.

Предпочтительные единицы: Бк; кБк; МБк; ГБк; ТБк; ПБк.

Удельная активность источника A_m — отношение активности A радионуклида в источнике (образце) к массе m источника (образца) или к массе элемента, соединения:

$$A_m = A/m;$$

dim $A_m = M^{-1}T^{-1}$, единица — беккерель на килограмм (Bq/kg; Бк/кг).

Беккерель на килограмм равен удельной активности источника, при которой активность радионуклида в источнике (элементе, соединении) массой в 1 кг равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: Бк/г; кБк/г; МБк/г; ГБк/г; ТБк/г.

Объемная активность источника A_v — отношение активности A радионуклида в источнике (образце) к его объему V:

$$A_v = A/V;$$

dim $A_v = L^{-3}T^{-1}$, единица — беккерель на кубический метр (Bq/m³; Бк/м³).

Беккерель на кубический метр равен объемной активности источника, при которой активность радионуклида в источнике объемом 1 м³ равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: Бк/мл; кБк/мл; МБк/мл; ГБк/мл; БК/л; кБк/л; МБк/л; Бк/м³.

Молярная активность источника A_{mol} — отношение активности A радионуклида в источнике (образце) к числу молей N вещества (соединения), содержащего данный радионуклид:

$$A_{mol} = A/N;$$

dim $A_{mol} = T^{-1}N^{-1}$, единица — беккерель на моль (Bq/mol; Бк/моль).

Беккерель на моль равен молярной активности, при которой в источнике (соединении), содержащем 1 моль радиоактивного вещества (соединения), активность равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: МБк/моль; ГБк/моль; МБк/ммоль; ГБк/ммоль; ТБк/ммоль.

Поверхностная активность источника A_s — отношение активности A радионуклида в источнике (образце), распределенной на поверхности источника, к площади S этой поверхности:

$$A_s = A/S;$$

dim $A_s = L^{-2}T^{-1}$, единица — беккерель на квадратный метр (Bq/m²; Бк/м²).

Беккерель на квадратный метр равен поверхностной активности, при которой активность радионуклида (радионуклидов), распределенного на поверхности площадью 1 м², равна 1 Бк.

Предпочтительные единицы: Бк/см²; кБк/см²; МБк/км²; ГБк/км².

Постоянная мощности воздушной кермы радионуклида (керма-постоянная) Γ_δ — отношение мощности воздушной кермы $\dot{K}_\delta$, создаваемой фотонами с энергией больше заданного порогового значения δ от точечного изотропно-излучающего источника данного радионуклида, находящегося в вакууме на расстоянии l от источника, умноженной на квадрат этого расстояния, к активности A источника:

$$\Gamma_\delta = \dot{K}_\delta l^2/A;$$

dim $\Gamma_\delta = L^4T^{-2}$, единица — грэй-метр в квадрате в секунду-беккерель (Gy·m²/(s·Bq); Гр·м²/(с·Бк)).

Грэй-метр в квадрате в секунду-беккерель равен постоянной мощности воздушной кермы радионуклида, при которой мощность воздушной кермы, создаваемой фотонным излучением с энергией больше δ, точечного изотропно-излучающего источника активностью 1 Бк в вакууме на расстоянии 1 м равна 1 Гр/с.

Предпочтительная единица: аГр·м²/(с·Бк).

Керма-эквивалент источника K_e — мощность воздушной кермы фотонного излучения с энергией фотонов больше заданного порогового значения δ точечного изотропно-излучающего источника, находящегося в вакууме, на расстоянии l от источника, умноженная на квадрат этого расстояния:

$$K_e = \dot{K} l^2;$$

dim $K_e = L^4T^{-3}$, единица — грэй-метр в квадрате в секунду (Gy·m²/s; Гр·м²/с).

Грэй-метр в квадрате в секунду равен керма-эквиваленту источника, при котором точечный изотропно-излучающий источник фотонов с энергией фотонов, большей δ, создает в вакууме на расстоянии 1 м мощность воздушной кермы 1 Гр/с.

Предпочтительные единицы: нГр·м²/с; мкГр·м²/с; мГр·м²/с; Гр·м²/с.

Постоянная радиоактивного распада радионуклида λ — отношение доли ядер dN/N радионуклида, распадающихся за интервал времени dt, к этому интервалу времени:

$$\lambda = \frac{1}{N}\frac{dN}{dt};$$

dim $\lambda = T^{-1}$, единица — секунда в минус первой степени ($с^{-1}$; $с^{-1}$).

Секунда в минус первой степени равна постоянной распада, при которой за 1 с число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в e раз (e — основание натурального логарифма).

Предпочтительные единицы: $с^{-1}$; $мин^{-1}$; $ч^{-1}$; $сут^{-1}$; $год^{-1}$.

Период полураспада радионуклида $T_{1/2}$ — время, в течение которого число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в 2 раза; dim $T_{1/2} = T$, единица — секунда (s, с).

Предпочтительные единицы: с; мин; ч; сут; год.

Средняя продолжительность жизни радионуклида τ — время, в течение которого число ядер радионуклида в результате радиоактивного распада уменьшается в e раз (e — основание натурального логарифма); dim $\tau = T$, единица — секунда (s; с).

Предпочтительные единицы: с; мин; ч; сут; год.

О порядке внедрения ГОСТ 8.417—81 в области измерения ионизирующих излучений

Методическими указаниями РД 50—454—84 установлен следующий порядок внедрения ГОСТ 8.417—81 в области ионизирующих излучений:

1. Предусматривается постепенное внедрение единиц СИ, т. е. допускается определенный переходный период, продолжительность которого определяется программами мероприятий по внедрению единиц СИ, разработанными министерствами и ведомствами СССР.

2. Учитывая широкое использование в различных отраслях народного хозяйства таких единиц, как рентген, рад, бэр и кюри, устанавливается единый для всех министерств и ведомств СССР переходный период до 1 января 1990 г.

3. Во время переходного периода в научно-технической документации (НТД) и различных публикациях следует указывать значения поглощенной дозы, эквивалентной дозы, кермы, активности и производных от них величин в единицах, приведенных в Методических указаниях РД 50-454-84 в качестве предпочтительных, помещая в скобках, в отдельных графах таблиц, в примечаниях или сносках, на параллельных шкалах графиков значения этих величин во внесистемных единицах.

4. В программах мероприятий следует предусмотреть, что с 1 января 1990 г. все приборы для измерения величин, указанных в п. 3, рекомендуется градуировать в предпочтительных единицах.

5. Имея в виду постепенный отказ от практического использования экспозиционной дозы и ее мощности, во время переходного периода их значения указываются во внесистемных единицах (Р, Р/с или в соответствующих дольных или кратных единицах). Значения этих величин в единицах СИ (Кл/кг, А/кг или в соответствующих десятичных дольных и кратных единицах) приводить не следует. Отмеченное выше распространяется и на использование гамма-постоянной (постоянная мощности экспозиционной дозы). Использование экспозиционной дозы и ее мощности после 1 января 1990 г. не рекомендуется.

6. С введением Методических указаний РД 50—454—84 должна быть прекращена разработка новых приборов для измерения экспозиционной дозы и ее мощности.

7. Считать целесообразным постепенную замену приборов для измерения экспозиционной дозы и ее мощности приборами для измерения поглощенной дозы, кермы, эквивалентной дозы и их мощности, увязав общие технические требования к этой аппаратуре с рекомендациями международных организаций.

1.4. МНОЖИТЕЛИ И ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕСЯТИЧНЫХ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ И ИХ НАИМЕНОВАНИЯ

Множитель	Приставка	Обозначение приставки		Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское			международное	русское
10^{18}	экса	E	Э	10^{-1}	деци	d	д
10^{15}	пета	P	П	10^{-2}	санти	c	с
10^{12}	тера	T	Т	10^{-3}	милли	m	м
10^{9}	гига	G	Г	10^{-6}	микро	μ	мк
10^{6}	мега	M	М	10^{-9}	нано	n	н
10^{3}	кило	k	к	10^{-12}	пико	p	п
10^{2}	гекто	h	г	10^{-15}	фемто	f	ф
10^{1}	дека	da	да	10^{-18}	атто	a	а

Примечания: 1. В соответствии с международным стандартом ИСО 31/0—74 десятичные кратные и дольные единицы не являются единицами СИ.

2. Приставки гекто, дека, деци и санти допускается применять только в наименованиях кратных и дольных единиц, уже получивших широкое распространение (гектар, декалитр, дециметр, сантиметр и др.).

При сложном наименовании производной единицы СИ приставку присоединяют к наименованию первой единицы, входящей в произведение или числитель дроби. Например, кПа·с/м, но не Па·кс/м.

В виде исключения из этого правила временно в обоснованных случаях, т. е. в случаях, когда это нашло широкое распространение, допускается присоединение приставки к наименованию единицы, входящей в знаменатель дроби. Например, кВ/см, А/мм, Бк/мл, кэВ/мкм.

Выбор десятичной кратной или дольной единицы от единицы СИ диктуется прежде всего удобством ее применения. Из многообразия кратных и дольных единиц, которые могут быть образованы при помощи приставок, выбирают единицу, приводящую к числовым значениям величины, приемлемым на практике. В принципе кратные и дольные единицы выбирают таким образом, чтобы числовые значения величины находились в диапазоне от 0,1 до 1000. В табл. 1.12 приведены рекомендуемые для применения кратные и дольные единицы от единиц СИ.

Для снижения вероятности ошибок при расчетах десятичные кратные и дольные единицы рекомендуется подставлять только в конечный результат, а в процессе вычислений все величины выражать в единицах СИ, заменяя приставки степенями числа 10.

Кроме десятичных кратных и дольных единиц допущены к использованию кратные и дольные единицы времени, плоского угла и относительных величин, не являющиеся десятичными. Например, единицы времени (минута, час, сутки), единицы плоского угла (градус, минута, секунда).

1.5. ВНЕСИСТЕМНЫЕ ЕДИНИЦЫ, ДОПУСКАЕМЫЕ К ПРИМЕНЕНИЮ НАРАВНЕ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Масса	тонна	t	т	10^3 кг
	атомная единица массы	u	а. е. м.	$1{,}66057 \cdot 10^{-27}$ кг (приблизительно)
Время*1	минута	min	*мин	60 с
	час	h	ч	3600 с
	сутки	d	сут	86400 с
Плоский угол	градус	...°	...°	$(\pi/180)$ рад $= 1{,}745329 \cdot 10^{-2}$ рад
	минута	...′	...′	$(\pi/10\,800)$ рад $= 2{,}908882 \ldots \cdot 10^{-4}$ рад
	секунда	...″	...″	$(\pi/648\,000)$ рад $= 4{,}848137 \ldots \cdot 10^{-6}$ рад
	град*2	g (gon)	град	$(\pi/200)$ рад
Объем, вместимость*3	литр	l	л	10^{-3} м^3
Длина	астрономическая единица	u. a.	а. е.	$1{,}45598 \cdot 10^{11}$ м (приблизительно)
	световой год	ly	св. год	$9{,}4605 \cdot 10^{15}$ м (приблизительно)
	парсек	pc	пк	$3{,}0857 \cdot 10^{16}$ м (приблизительно)
Оптическая сила	диоптрия	—	дптр	1 м$^{-1}$
Площадь	гектар	ha	га	10^4 м^2
Энергия	электрон-вольт	eV	эВ	$1{,}60219 \cdot 10^{-19}$ Дж (приблизительно)
Полная мощность	вольт-ампер	V·A	В·А	
Реактивная мощность	вар	var	вар	

*1 Допускается также применять другие единицы, получившие широкое распространение, например неделя, месяц, год, век, тысячелетие и т. п.

*2 Допускается применять по-русски наименование «гон».

*3 Не рекомендуется применять при точных измерениях. При возможности смешения обозначения *l* с цифрой 1 допускается обозначение *L*.

Примечание. Единицы времени (минуту, час, сутки), плоского угла (градус, минуту, секунду), астрономическую единицу, световой год, диоптрию и атомную единицу массы не допускается применять с приставками.

1.6. ПЕРЕЧЕНЬ НЕКОТОРЫХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ И ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИХ ЕДИНИЦ

Наименование величины	Единица			Определение	Примечание
	Наименование	Обозначение			
		международное	русское		
1. Относительная величина (безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную) КПД, относительное удлинение, относительная плотность, относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, магнитная восприимчивость, массовая доля, молярная доля и т. п.	единица (число 1)	—	—	1	—
	процент	%	%	10^{-2}	—
	промилле	‰	‰	10^{-3}	—
	миллионная доля	ppm	млн$^{-1}$	10^{-6}	—
2. Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную):	бел	B	Б	1 Б $= \lg (P_2/P_1)$ при $P_2 = 10P_1$, 1 Б $= 2 \lg (F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt{10}\,F_1$	P_1, P_2 — одноименные энергетические величины (мощности, энергии, плотности энергии и т. п.) F_1, F_2 — одноименные «силовые» величины (напряжения, силы тока, давления, напряженности поля и т. п.)

Продолжение табл. 1.6

Наименование величины	Единица			Определение	Примечание
	Наименование	Обозначение: международное	Обозначение: русское		
уровень звукового давления, усиление, ослабление и т. п.)*1	децибел	dB	дБ	0,1 Б	
3. То же, уровень громкости	фон	phon	фон	1 фон равен уровню громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 Гц равен 1 дБ	—
4. То же, частотный интервал	октава	—	—	1 октава равна $\log_2 (f_2/f_1)$ при $f_2/f_1=2$	f_1, f_2 — частоты
	декада	—	—	1 декада равна $\lg (f_2/f_1)$ при $f_2/f_1=10$	

*1 В соответствии с публикацией 27—3 Международной электротехнической комиссии (МЭК) при необходимости указать исходную величину, ее значение помещают в скобках после обозначения логарифмической величины, например для уровня звукового давления L_p (re 20μ Pa) =20dB; L_p (re 20 мкПа) = 20 дБ (re — начальные буквы слова reference, т. е. исходный). При краткой форме записи значение исходной величины указывают в скобках после значений уровня, например 20 дБ (re 20μPa) или 20 дБ (re 20 мкПа).

1.7. ЕДИНИЦЫ, ВРЕМЕННО ДОПУСКАЕМЫЕ К ПРИМЕНЕНИЮ

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ	Примечание
	Наименование	Обозначение: международное	Обозначение: русское		
Длина	Морская миля	—	миля	1852 м (точно)	В морской навигации
Масса	карат	—	кар	$2 \cdot 10^{-4}$ кг (точно)	Для драгоценных камней и жемчуга
Линейная плотность	текс	tex	текс	10^{-6} кг/м (точно)	В текстильной промышленности
Скорость	узел	kn	уз	0,514 (4) м/с	В морской навигации
Частота вращения	оборот в секунду	—	об/с	1 $с^{-1}$	—
	оборот в минуту	—	об/мин	1/60 $с^{-1}$ = 0,016 (6) $с^{-1}$	—
Давление	бар	bar	бар	10^5 Па	—
Натуральный логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную	непер	Np	Нп		1 Np = 0,8686. . . B = = 8,686 . . . dB

Примечание. Приведенные в табл. 1.7 единицы временно допускается применять до принятия по ним соответствующих международных решений.

1.8. СООТНОШЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ВНЕСИСТЕМНЫХ ЕДИНИЦ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Длина	ангстрем	Å	Å	10^{-10} м
	икс-единица	X	икс-ед	$1{,}00206 \cdot 10^{-13}$ м (приблизительно)
Площадь	барн	b	б	10^{-28} м^2
Масса	центнер	q	ц	100 кг
Телесный угол	квадратный градус	□°	□°	$3{,}0462 \ldots 10^{-4}$ ср
Ускорение	гал	Gal	Гал	0,01 м/с^2
Сила, вес	дина	din	дин	10^{-5} Н
	килограмм-сила	kgf	кгс	9,80665 Н (точно)
	килопонд	kp	—	9,80665 Н »
	грамм-сила	gf	гс	$9{,}80665 \cdot 10^{-3}$ Н (точно)
	понд	p	—	$9{,}80665 \cdot 10^{-3}$ Н (точно)
	тонна-сила	tf	тс	9806,65 Н (точно)
Давление	килограмм-сила на квадратный сантиметр	kgf/cm^2	кгс/см^2	98066,5 Па (точно)
				98065,5 Па (точно)
	килопонд на квадратный сантиметр	kp/cm^2	—	98065,5 Н (точно)
	миллиметр водяного столба	mm H_2O	мм вод. ст.	9,80665 Па (точно)
	миллиметр ртутного столба	mm Hg	мм рт. ст.	133,322 Па (точно)
	торр	Torr	—	133,322 Па (точно)
Напряжение (механическое)	килограмм-сила на квадратный миллиметр	kgf/mm^2	кгс/мм^2	$9{,}80665 \cdot 10^6$ Па (точно)
	килопонд на квадратный миллиметр	kp/mm^2	—	$9{,}80665 \cdot 10^6$ Па (точно)
Работа, энергия	эрг	erg	эрг	10^{-7} Дж
Мощность	лошадиная сила	—	л. с.	735,499 Вт
Динамическая вязкость	пуаз	P	П	0,1 Па·с
Кинематическая вязкость	стокс	St	Ст	10^{-4} м^2/с
Удельное электрическое сопротивление	ом-квадратный миллиметр на метр	Ω mm^2/m	Ом·мм^2/м	10^{-6} Ом · м
Магнитный поток	максвелл	Mx	Мкс	10^{-8} Вб
Магнитная индукция	гаусс	Gs	Гс	10^{-4} Тл
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	гильберт	Gb	Гб	$10/(4\pi)$ А = 0,795775 ... А
Напряженность магнитного поля	эрстед	Oe	Э	$10^3/(4\pi)$ А/м=79,5775 ... А/м
Количество теплоты, термодинамический потенциал (внутренняя энергия, энтальпия, изохорно-изотермический потенциал), теплота фазового превращения, теплота химической реакции	калория (межд.)	cal	кал	4,1868 Дж (точно)
	калория термохимическая	cal_{th}	$кал_{тх}$	4,1840 Дж (приблизительно)
	калория 15-градусная	cal_{15}	$кал_{15}$	4,1855 Дж (приблизительно)
Поглощенная доза излучения	рад	rad, rd	рад	0,01 Гр
Эквивалентная доза излучения, показатель эквивалентной дозы	бэр	rem	бэр	0,01 Зв
Экспозиционная доза фотонного излучения (экспозиционная доза γ-и рентгеновского излучения)	рентген	R	Р	$2{,}58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг (точно)
Активность нуклида в радиоактивном источнике	кюри	Ci	Ки	$3{,}700 \cdot 10^{10}$ Бк (точно)
Длина	микрон	μ	мк	10^{-6} м
Угол поворота	оборот	r	об	2π рад = 6,28 ... рад
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	ампер-виток	At	ав	1 А
Яркость	нит	nt	нт	1 кд/м^2
Площадь	ар	a	а	100 м^2

1.9. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН В СИСТЕМАХ СГС И СИ

Наименование величины	Соотношение между единицами
Сила электрического тока	1 СГС (СГСЭ) = $3{,}33564 \cdot 10^{-10}$ А 1 СГСМ = 10 А
Количество электричества. Электрический заряд	1 СГС (СГСЭ) = $3{,}33564 \cdot 10^{-10}$ Кл 1 СГСМ = 10 Кл
Поверхностная плотность электрического заряда	1 СГС (СГСЭ) = $3{,}33564 \cdot 10^{-6}$ Кл/м^2 1 СГСМ = 10^5 Кл/м^2
Пространственная плотность электрического заряда	1 СГС (СГСЭ) = $3{,}33564 \cdot 10^{-4}$ Кл/м^3 1 СГСМ = $1 \cdot 10^7$ Кл/м^3
Напряженность электрического поля	1 СГС (СГСЭ) = $2{,}997825 \cdot 10^4$ В/м 1 СГСМ = $1 \cdot 10^{-6}$ В/м
Электрическое напряжение, электрический потенциал, ЭДС	1 СГС (СГСЭ) = $2{,}997925 \cdot 10^2$ В 1 СГСМ = $1 \cdot 10^{-8}$ В
Поток электрического смещения	1 СГС (СГСЭ) = $2{,}65442 \cdot 10^{-11}$ Кл 1 СГСМ = 795775 Кл
Электрическое смещение	1 СГС (СГСЭ) = $2{,}65442 \cdot 10^{-7}$ Кл/м^2 1 СГСМ = $0{,}795775 \cdot 10^3$ Кл/м^2
Электрическая ёмкость	1 СГС (СГСЭ) = $1{,}11265 \cdot 10^{-12}$ Ф 1 СГСМ = $1 \cdot 10^9$ Ф
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	1 СГС (СГСЭ) = $8{,}854187 \cdot 10^{-12}$ Ф/м 1 СГСМ = $7{,}95775 \cdot 10^9$ Ф/м
Электрический момент диполя	1 СГС (СГСЭ) = $3{,}33564 \cdot 10^{-12}$ Кл·м 1 СГСМ = 0,1 Кл·м
Плотность электрического тока	1 СГС (СГСЭ) = $3{,}33564 \cdot 10^{-6}$ А/м^2 1 СГСМ = $1 \cdot 10^5$ А/м^2
Линейная плотность электрического тока	1 СГС (СГСЭ) = $3{,}33564 \cdot 10^{-8}$ А/м 1 СГСМ = $1 \cdot 10^3$ А/м
Напряженность магнитного поля	1 СГС (СГСМ), эрстед (Э) = 79,5775 А/м 1 СГСЭ = $2{,}65442 \cdot 10^{-9}$ А/м
Магнитодвижущая сила. Разность магнитных потенциалов	1 СГС (СГСМ), гильберт (Гб) = 0,795775 А 1 СГСЭ = $2{,}65442 \cdot 10^{-11}$ А
Магнитная индукция	1 СГС (СГСМ), гаусс (Гс) = $1 \cdot 10^{-4}$ Тл 1 СГСЭ = $2{,}997925 \cdot 10^6$ Тл
Магнитный поток	1 СГС (СГСМ), максвелл (Мкс) = $1 \cdot 10^{-8}$ Вб 1 СГСЭ = 299,7925 Вб
Индуктивность. Взаимная индуктивность	1 СГС (СГСМ) = $1 \cdot 10^{-9}$ Гн 1 СГСЭ = $8{,}98755 \cdot 10^{11}$ Гн
Абсолютная магнитная проницаемость	1 СГС (СГСМ) = $1{,}256637 \cdot 10^{-8}$ Гн/м 1 СГСЭ = $1{,}12941 \cdot 10^{15}$ Гн/м
Магнитный момент (амперовский)	1 СГС (СГСМ) = $1 \cdot 10^{-3}$ А·м^2 1 СГСЭ = $3{,}33564 \cdot 10^{-14}$ А·м^2
Магнитный момент (кулоновский)	1 СГС (СГСМ) = $1 \cdot 10^{-10}$ Вб/м 1 СГСЭ = 2,997925 Вб·м
Намагниченность	1 СГС (СГСМ) = $1 \cdot 10^3$ А/м 1 СГСЭ = $3{,}33564 \cdot 10^{-6}$ А/м
Электрическое сопротивление	1 СГС (СГСЭ) = $8{,}98755 \cdot 10^{11}$ Ом 1 СГСМ = $1 \cdot 10^{-9}$ Ом
Электрическая проводимость	1 СГС (СГСЭ) = $1{,}11265 \cdot 10^{-12}$ См 1 СГСМ = $1 \cdot 10^9$ См
Удельное электрическое сопротивление	1 СГС (СГСЭ) = $8{,}98755 \cdot 10^9$ Ом·м 1 СГСМ = $1 \cdot 10^{-11}$ Ом·м
Удельная электрическая проводимость	1 СГС (СГСЭ) = $1{,}11265 \cdot 10^{-10}$ См/м 1 СГСМ = $1 \cdot 10^{11}$ См/м
Магнитное сопротивление	1 СГС (СГСМ) = $79{,}5775 \cdot 10^6$ А/Вб 1 СГСЭ = $8{,}854186 \cdot 10^{-14}$ А/Вб
Магнитная проводимость	1 СГС (СГСМ) = $1{,}256637 \cdot 10^{-3}$ Вб/А 1 СГСЭ = $1{,}12941 \cdot 10^{13}$ Вб/А

1.10. СООТНОШЕНИЯ ВНЕСИСТЕМНЫХ ЕДИНИЦ РАДИОАКТИВНОСТИ И ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Наименование величины	Внесистемные единицы			Соотношение с единицей СИ
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Плотность потока ионизирующих частиц	сантиметр в минус второй степени-час в минус первой степени	$cm^{-2} \cdot h^{-1}$	$см^{-2} \cdot ч^{-1}$	$2{,}778 \cdot м^{-2}\ с^{-1}$
Интенсивность излучения	эрг-сантиметр в минус второй степени-секунда в минус первой степени	$erg \cdot (cm^{-2} \cdot s^{-1})$	$эрг \cdot (см^{-2} \cdot с^{-1})$	10^{-3} Вт/м²
	эрг-сантиметр в минус второй степени-минута в минус первой степени	$erg \cdot (cm^{-2} \cdot min^{-1})$	$эрг \cdot (см^{-2} \cdot мин^{-1})$	$1{,}667 \cdot 10^{-5}$ Вт/м²
	эрг-сантиметр в минус второй степени-час в минус первой степени	$erg \cdot (cm^{-2} \cdot h^{-1})$	$эрг \cdot (см^{-2} \cdot ч^{-1})$	$2{,}778 \cdot 10^{-7}$ Вт/м²
Поглощенная доза излучения	эрг-грамм в минус первой степени	$erg \cdot g^{-1}$	$эрг \cdot г^{-1}$	10^{-4} Дж/кг
	рад	rad	рад	0,01 Гр
Мощность поглощенной дозы излучения	эрг-грамм в минус первой степени-секунда в минус первой степени	$erg \cdot (g^{-1} \cdot s^{-1})$	$эрг \cdot (г^{-1} \cdot с^{-1})$	10^{-4} Вт/кг
	рад-секунда в минус первой степени	$rad \cdot s^{-1}$	$рад \cdot с^{-1}$	0,01 Гр/с
	рад-час в минус первой степени	$rad \cdot h^{-1}$	$рад \cdot ч^{-1}$	$2{,}778 \cdot 10^{-6}$ Гр/с
Экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучений	рентген	R	Р	$2{,}58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и γ-излучений	рентген в секунду	R/s	Р/с	$2{,}58 \cdot 10^{-4}$ А/кг
	рентген в минуту	R/min	Р/мин	$4{,}3 \cdot 10^{-6}$ А/кг
	рентген в час	R/h	Р/ч	$7{,}17 \cdot 10^{-8}$ А/кг

1.11. СООТНОШЕНИЕ СИСТЕМЫ АТОМНЫХ ЕДИНИЦ ХАРТРИ $e=m_e=\hbar$ И СИСТЕМЫ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЕДИНИЦ $c=m_e=\hbar$ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Величина	Единица системы m_e, $\hbar$, e	Единица системы m_e, $\hbar$, c
Длина	$5{,}292 \cdot 10^{-11}$ м	$3{,}862 \cdot 10^{-13}$ м
Время	$2{,}419 \cdot 10^{-17}$ с	$1{,}288 \cdot 10^{-21}$ с
Площадь	$2{,}800 \cdot 10^{-21}$ м²	$1{,}491 \cdot 10^{-25}$ м²
Скорость	$2{,}188 \cdot 10^{6}$ м/с	$2{,}998 \cdot 10^{8}$ м/с
Ускорение	$9{,}043 \cdot 10^{22}$ м/с²	$2{,}327 \cdot 10^{29}$ м/с²
Масса	$9{,}109 \cdot 10^{-31}$ кг	$9{,}109 \cdot 10^{-31}$ кг
Сила	$8{,}237 \cdot 10^{-8}$ Н	$2{,}120 \cdot 10^{-1}$ Н
Импульс (количество движения)	$1{,}993 \cdot 10^{-24}$ кг · м/с	$2{,}731 \cdot 10^{-22}$ кг · м/с
Момент силы	$4{,}360 \cdot 10^{-18}$ Н · м	$8{,}187 \cdot 10^{-14}$ Н · м
Момент импульса (количество движения)	$1{,}055 \cdot 10^{-34}$ Дж · с	$1{,}055 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Работа, энергия	$4{,}360 \cdot 10^{-18}$ Дж	$8{,}187 \cdot 10^{-14}$ Дж
Электрический заряд	$1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Кл	$1{,}876 \cdot 10^{-18}$ Кл
Сила тока	$6{,}624 \cdot 10^{-3}$ А	$1{,}456 \cdot 10^{3}$ А
Напряженность электрического поля	$5{,}130 \cdot 10^{11}$ В/м	$1{,}131 \cdot 10^{17}$ В/м
Потенциал	27,22 В	$4{,}366 \cdot 10^{4}$ В
Магнитная индукция	$1{,}715 \cdot 10^{3}$ Тл	$3{,}771 \cdot 10^{8}$ Тл
Магнитный момент	$2{,}542 \cdot 10^{-21}$ А · м²	$2{,}171 \cdot 10^{-22}$ А · м²

1.12. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КРАТНЫЕ И ДОЛЬНЫЕ ЕДИНИЦЫ ОТ ЕДИНИЦ СИ И ОТ ЕДИНИЦ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НАРАВНЕ С ЕДИНИЦАМИ СИ

Наименование величины	Обозначения рекомендуемых кратных и дольных единиц
Часть I. Пространство и время	
Плоский угол	мрад, мкрад
Длина	км, см, мм, мкм, нм
Площадь	км², дм², см², мм²
Объем, вместимость	дм³, см³, мм³, гл, дл, сл, мл
Время	кс, мс, мкс, нс
Скорость	км/ч
Часть II. Периодические и связанные с ними явления	
Частота периодического процесса	ТГц, ГГц, МГц, кГц
Часть III. Механика	
Масса	Мг, г, мг, мкг, Мт, кт, дт
Линейная плотность	мг/м, г/км
Плотность	Мг/м³, кг/дм³, г/см³, г/мл, г/л
Сила, вес	МН, кН, мН, мкН
Момент силы	МН · м, кН · м, мН·м, мкН · м
Давление	ГПа, МПа, кПа, гПа, даПа, мПа, мкПа
Напряжение	ГПа, МПа, кПа
Динамическая вязкость	МПа · с
Кинематическая вязкость	мм²/с
Поверхностное натяжение	мН/м
Энергия, работа	ТДж, ГДж, МДж, кДж, мДж, ГэВ, МэВ, кэВ
Мощность	ГВт, МВт, кВт, мВт, мкВт
Часть IV. Теплота	
Температура	МК, кК, мК, мкК
Теплота, количество теплоты	ТДж, ГДж, МДж, кДж, мДж
Тепловой поток	кВт, мВт
Теплоемкость	кДж/К
Удельная теплоемкость	кДж/(кг · К)
Энтропия	кДж/К
Удельная энтропия	кДж/(кг · К)
Удельное количество теплоты	МДж/кг, кДж/кг
Удельная теплота фазового превращения	МДж/кг, кДж/кг
Часть V. Электричество и магнетизм	
Электрический ток (сила электрического тока)	кА, мА, мкА, нА, пА
Количество электричества, электрический заряд	кКл, мкКл, нКл, пКл
Пространственная плотность электрического заряда	Кл/мм³, МКл/м³, Кл/см³, кКл/м³, мКл/м³, мкКл/м³
Поверхностная плотность электрического заряда	МКл/м², Кл/мм², Кл/см², кКл/м², мКл/м², мКл/м²

Продолжение табл. 1.12

Наименование величины	Обозначения рекомендуемых кратных и дольных единиц
Напряженность электрического поля	МВ/м, кВ/м, В/мм, В/см, мВ/м, мкВ/м
Электрическое напряжение, электрический потенциал, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	МВ, кВ, мВ, мкВ, нВ
Электрическое смещение	Кл/см², кКл/см², мКл/м², мкКл/м²
Поток электрического смещения	МКл, кКл, мКл
Электрическая емкость	мФ, мкФ, нФ, пФ
Абсолютная диэлектрическая проницаемость, электрическая постоянная	мкФ/м, нФ/м, пФ/м
Поляризованность	Кл/см², кКл/м², мКл/м², мкКл/м²
Плотность электрического тока	МА/м², А/мм², А/см², кА/м²
Линейная плотность электрического тока	кА/м, А/мм, А/см
Напряженность магнитного поля	кА/м, А/мм, А/см
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	кА, мА
Магнитная индукция, плотность магнитного потока	мТл, мкТл, нТл
Магнитный поток	мВб
Магнитный векторный потенциал	кТл · м
Индуктивность, взаимная индуктивность	мГн, мкГн, нГн, пГн
Абсолютная магнитная проницаемость, магнитная постоянная	мкГн/м, нГн/м
Намагниченность	кА/м, А/мм
Магнитная поляризация	мТл
Электрическое сопротивление	ТОм, ГОм, МОм, кОм, мОм, мкОм
Электрическая проводимость	кСм, мСм, мкСм
Удельное электрическое сопротивление	ГОм·м, МОм·м, кОм·м, Ом·см, мОм·м, мкОм·м, нОм·м
Удельная электрическая проводимость	МСм/м, кСм/м
Полное сопротивление	МОм, кОм, мОм
Полная проводимость	кСм, мСм
Активная проводимость	мкСм
Реактивная проводимость	кСм, мСм
Активная мощность	ТВт, ГВт, МВт, кВт, мВт, мкВт, нВт
Часть VI. Свет и связанные с ним электромагнитные излучения	
Длина волны	мкм, нм, пм
Волновое число	$см^{-1}$
Световая энергия	лм · ч

Продолжение табл. 1.12

Наименование величины	Обозначения рекомендуемых кратных и дольных единиц
Часть VII. Акустика	
Период	мс, мкс
Частота периодического процесса	МГц, кГц
Длина волны	мм
Звуковое давление	мПа, мкПа
Скорость колебания частицы	мм/с
Поток звуковой энергии, звуковая мощность	кВт, мВт, мкВт, пВт
Интенсивность звука	мВт/м^2, мкВт/м^2, пВт/м^2
Часть VIII. Физическая химия и молекулярная физика	
Количество вещества	кмоль, ммоль, мкмоль
Молярная масса	г/моль
Молярный объем	дм^3/моль, см^3/моль, л/моль
Молярная внутренняя энергия	кДж/моль
Молярная энтальпия	кДж/моль
Химический потенциал	кДж/моль
Химическое сродство	кДж/моль
Молярная концентрация	кмоль/м^3, моль/л, моль/дм^3
Удельная адсорбция	ммоль/кг
Часть IX. Ионизирующие излучения	
Поглощенная доза излучения, керма, показатель поглощенной дозы (поглощенная доза ионизирующего излучения)	ТГр, ГГр, МГр, кГр, мГр, мкГр
Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность радионуклида)	ЭБк, ПБк, ТБк, ГБк, МБк, кБк

1.13. СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Длина

Ангстрем (Å, Å)*[1]; 1 Å$=10^{-10}$ м

Астрономическая единица (u.a., a.e.); 1 a.e.$=1{,}49597870\times10^{11}$ м
Дюйм (in, —); 1 дюйм$=0{,}025\ 4$ м (точно)
Икс-единица (X, икс-ед); 1 икс-ед$=1{,}00206\cdot10^{-13}$ м
Кабельтов (—, —); 1 кабельтов$=185{,}2$ м
Микрон (μ, мк); 1 мк$=1\cdot10^{-6}$ м
Миля морская (n. mile, —); 1 миля морская$=1852$ м (точно)
Миля сухопутная (mile, —); 1 миля сухопутная$=1609{,}344$ м (точно)
Парсек (pk, пк); 1 пк$=3{,}085678\cdot10^{16}$ м
Световой год (ly, св. год); 1 св. год$=9{,}490530\cdot10^{15}$ м
Ферми (—, —); 1 ферми$=1\cdot10^{-15}$ м
Фут (ft, —); 1 фут$=0{,}3048$ м (точно)
Ярд (yd, —); 1 ярд$=0{,}9144$ м (точно)

Площадь

Ар (a, а); 1 а$=100$ м^2
Барн (b, б); 1 б$=1\cdot10^{-28}$ м^2
Гектар (ha, га); 1 га$=1\cdot10^4$ м^2
Квадратный дюйм (in^2, —); 1 кв. дюйм$=6{,}4516\cdot10^{-4}$ м^2 (точно)
Квадратный фут (ft^2, —); 1 кв. фут$=9{,}29030\cdot10^{-2}$ м^2
Квадратный ярд (yd^2, —); 1 кв. ярд$=0{,}83613$ м^2

Объем

Баррель (Великобрит.) (для сыпучих веществ) (—, —); 1 баррель (Великобрит.)$=0{,}16365$ м^3
Баррель нефтяной (США) (—, —); 1 баррель нефтяной (США)$=0{,}158988$ м^3
Баррель сухой (США) [bbl (US), —]; 1 баррель сухой (США)$=0{,}115628$ м^3
Бушель (Великобрит.) (—, —); 1 бушель (Великобрит.)$=3{,}63687\cdot10^{-2}$ м^3
Бушель (США) (bu, —); 1 бушель (США)$=3{,}52393\times10^{-2}$ м^3
Галлон (Великобрит.) [gal (UK), —]; 1 галлон (Великобрит.)$=4{,}54609\cdot10^{-3}$ м^3
Галлон для жидкостей (США) [gal (US), —]; 1 галлон для жидкостей (США)$=3{,}78543\cdot10^{-3}$ м^3
Галлон для сыпучих веществ (США) (—, —); 1 галлон для сыпучих веществ (США)$=4{,}405\cdot10^{-3}$ м^3
Дюйм кубический (in^3, —); 1 дюйм кубический$=1{,}63871\cdot10^{-5}$ м^3
Литр (l, л); 1 л$=1\cdot10^{-3}$ м^3
Лямбда (λ, λ); 1 λ$=1\cdot10^{-9}$ м^3
Пинта (Великобрит.) [pt (UK), —]; 1 пинта (Великобрит.)$=5{,}68261\cdot10^{-4}$ м^3
Пинта для жидкостей (США) [liq pt (US), —]; 1 пинта для жидкостей (США)$=4{,}73179\cdot10^{-4}$ м^3
Пинта для сыпучих веществ (США) [dry pt (US), —]; 1 пинта для сыпучих веществ (США)$=5{,}50614\times10^{-4}$ м^3
Унция (Великобрит.) [fl·oz (UK), —]; 1 унция (Великобрит.)$=2{,}841\cdot10^{-5}$ м^3
Унция (США) [fl·oz (US), —]; 1 унция (США$=2{,}957\times10^{-5}$ м^3
Фут кубический (ft, —); 1 фут кубический$=2{,}83168\times10^{-2}$м^3
Ярд кубический (yd^3, —); 1 ярд кубический$=0{,}76455$ м^3

Плоский угол

Град, гон (...^{g}, град); 1 град$=0{,}01570796$ рад
Градус (...°, ...°); 1°$=0{,}01745329$ рад
Минута (..., ...′); 1′$=2{,}908882\cdot10^{-4}$ рад
Полный угол, оборот (—, об); 1 об$=6{,}283185$ рад
Прямой угол (... ∟, ... ∟); 1∟$=1{,}570796$ рад
Румб в метеорологии (—, —); 1 румб в метеорологии$=0{,}392699$ рад
Румб в морской навигации (—, —); 1 румб в морской навигации$=0{,}1963495$ рад
Секунда (..., ...″); 1″$=4{,}848137\cdot10^{-6}$ рад

Телесный угол

Квадратный градус (□°, □°); 1□°$=3{,}0462\cdot10^{-4}$ ср
Полный телесный угол (—, —); 1 полный телесный угол$=12{,}56637$ ср

[1] В скобках даны международное и русское обозначения единиц. В случае отсутствия обозначения единицы вместо него сделан прочерк.

Время

Год (a, год); 1 год=3,15569259747·10^7 с (на 1900 г., за 100 лет год сокращается на 0,5305 с)
Минута (min, мин); 1 мин=60 с
Сутки (d, сут); 1 сут=86 400 с
Час (h, ч); 1 ч=3600 с

Температура

Градус Ранкина (°Ra, °Ra); 1°Ra=0,556 К
Градус Реомюра (°R, °R); 1°R=1,25 К
Градус Фаренгейта (°F, °F); 1°F=0,556 К
Градус Цельсия (°C, °C); 1°C=1 К

Скорость

Километр в час (km/h, км/ч); 1 км/ч=0,277 7 м/с
Миля в час (mile/h, —); 1 мили в час=0,44704 м/с (точно)
Узел морской (kn, уз); 1 уз=0,514444 м/с
Фут в секунду (ft/s, —); 1 фут в секунду=0,3048 м/с (точно)

Ускорение

Гал (Gal, Гал); 1 Гал=0,01 м/с^2

Угловая скорость

Градус в секунду (°/s, °/с); 1°/с=0,017453 3 рад/с
Полный угол в мииуту (—, —); 1 полный угол в минуту=0,1047197 рад/с
Полный угол в секунду (—, —); 1 полный угол в секииду=6,283185 рад/с
Прямой угол в секунду (∟/s,∟ /с); 1∟ /с=1,57080 рад/с
Радиан в минуту (rad/min, рад/мин); 1 рад/мин=0,0166667 рад/с

Частота вращения

Оборот в минуту (—, об/мин); 1 об/мин=0,016 (6) с$^{-1}$
Оборот в секунду (—, об/с); 1 об/с=1 с$^{-1}$

Масса

Атомиая единица массы (u, а.е.м.); 1 а.е.м.=1,66056××10^{-27} кг
Гамма (γ, —), 1 гамма=1·10^{-9} кг
Грамм (g, г); 1 г=1·10^{-3} кг
Гран (gr, —); 1 гран=6,479891·10^{-5} кг
Карат (—, кар); 1 кар=2·10^{-4} кг (точно)
Слаг (slyg, —); 1 слаг=14,5939 кг
Техническая единица массы (—, т.е.м.); 1 т.е.м.=9,8066 кг (точно)
Тоииа (t, т); 1 т=1000 кг
Тоина (Великобрит.) (ton, —); 1 тонна (Великобрит.)=1016,05 кг
Тонна короткая (Великобрит.) (sh. ton, —); 1 тонна короткая (Великобрит.)=907,185 кг
Уиция аптекарская (oz apoth, —); 1 унция аптекарская=31,1035·10^{-3} кг
Унция аптекарская (русская) (—, —); 1 унция аптекарская (русская)=2,986·10^{-2} кг
Унция торговая (oz, —); 1 унция торговая=28,3495××10^{-3} кг
Унция тройская (oz tr, —); 1 унция тройская=31,1035××10^{-3} кг
Фунт торговый (lb, —); 1 фунт торговый=0,45359237 кг
Фунт в системе рус. мер (—, —); 1 фунт в системе рус. мер=0,40951241 кг
Фунт (США) [lb (US), —]; 1 фунт (США)=0,4535924277 кг
Центнер, кратная единица СИ (q, ц); 1 ц=100 кг
Центнер (Великобрит.) (cwt, —); 1 центнер (Великобрит.)=50,8023 кг
Центнер короткий (Велнкобрит.) (sh. cwt, —); 1 центнер короткий=45,3592 кг

Плотность

Грамм на кубический дюйм (g/in^3, —); 1 грамм на кубический дюйм=61,0 кг/м^3
Грамм на кубический метр (—, г/м^3); 1 г/м^3=1·10^{-3} кг/м^3
Грамм на кубнческий сантиметр (g/cm^3, г/см^3); 1 г/см^3=1·10^3 кг/м^3
Грамм на кубический фут (g/ft^3, —); 1 грамм на кубический фут=3,53·10^{-2} кг/м^3
Грамм иа литр (g/l, г/л); 1 г/л=1 кг/м^3
Унция на кубический дюйм (oz/in^3, —); 1 унция на кубический дюйм=1,73·10^3 кг/м^3
Унции на кубический сантиметр (oz/cm^3, —); 1 унция на кубический сантиметр=2,835·10^4 кг/м^3
Унция иа кубический фут (—, —); 1 унция иа кубический фут=1,0014 кг/м^3
Фуит иа кубический фут (lb/ft^3, —); 1 фунт иа кубический фут=16,0185 кг/м^3

Линейная плотность

Текс (tex, текс); 1 текс=1·10^{-6} кг/м (точно)

Сила

Дина (din, дин); 1 дин=1·10^{-5} Н
Килограмм-сила (kgf, кгс); 1 кгс=9,80665 Н (точно)
Килопоид (kp, —); 1 килопонд=9,80665 Н (точно)
Паундаль (pdl, —); 1 паундаль=0,138255 Н (точно)
Понд (p, —); 1 понд=9,80665·10^{-3} Н (точно)
Стеи (sn, си); 1 си=1·10^3 Н
Тоииа-сила (tf, тс); 1 тс=9,80665·10^3 Н (точно)
Фунт-сила (lbf, —); 1 фуит-сила=4,44822 Н

Давление

Атмосфера техиическая (at, ат); 1 ат=9,80665·10^4 Па (точно)
Атмосфера физическая (atm, атм); 1 атм=1,01325·10^5 Па (точно)
Бар (bar, бар); 1 бар=1·10^5 Па
Дина на квадратный саитиметр (din/cm^2, дин/см^2); 1 дин/см^2=0,1 Па
Дюйм водяного столба (in H_2O, —); 1 дюйм вод. ст.=249,089 Па
Дюйм ртутного столба (in Hg, —); 1 дюйм рт. ст.=3386,39 Па
Килограмм-сила на квадратный метр (kgf/m^2, кгс/м^2); 1 кгс/м^2=9,80665 Па (точно)
Килограмм-сила на квадратный сантиметр (kgf/cm^2, кгс/см^2); 1 кгс/см^2=9,80665·10^4 Па (точно)
Килопонд иа квадратиый саитиметр (kp/cm^2, —); 1 килопонд на кв. см=9,80665·10^4 Па (точно)
Миллиметр водяного столба (mm H_2O, мм вод. ст.); 1 мм вод. ст.=9,80665 Па (точно)
Миллиметр ртутного столба (mm Hg, мм рт. ст.); 1 мм рт. ст.=133,322 Па
Пьеза (pz, пз); 1 пз=1·10^3 Па
Тонна-сила иа квадратный метр (tf/m^2, тс/м^2); 1 тс/м^2=9,80665·10^3 Па (точно)
Торр (Torr, —); 1 торр=133,322 Па

Фунт-сила на квадратный дюйм (lbf/in², —); 1 фунт-сила на кв. дюйм=$6{,}89476 \cdot 10^3$ Па
Фут водяного столба (ft H_2O, —); 1 фут вод. ст.=$2{,}98907 \cdot 10^3$ Па

Импульс (количество движения)

Грамм-сантиметр в секунду (g·cm/s, г·см/с); 1 г·см/с=$1 \cdot 10^{-5}$ кг·м/с
Килограмм-сила-секунда (kgf·s, кгс·с); 1 кгс·с=9,80665 кг·м/с
Тонна-метр в секунду (—, т·м/с); 1 т·м/с=$1 \cdot 10^3$ кг·м/с

Момент силы

Дина-сантиметр (din·cm, дин·см); 1 дин·см=$1 \cdot 10^{-7}$ Н·м
Килограмм-сила-метр (kgf·m, кгс·м); 1 кгс·м=9,80665 Н·м (точно)
Килопонд-метр (kp·m; —); 1 килопонд-метр=9,80665 Н·м (точно)
Фунт-сила-фут (lbf·ft,—); 1 фунт-сила-фут=1,35582 Н·м

Момент импульса (момент количества движения)

Грамм-квадратный сантиметр на секунду (g·cm²/s, г·см²/с); 1 г·см²/с=$1 \cdot 10^{-7}$ кг·м²/с
Килограмм-сила-метр-секунда (kgf·m·s, кгс·м·с); 1 кгс·м·с=9,80665 кг·м²·с
Тонна-метр в квадрате на секунду (—, т·м²/с); 1 т·м²/с=$1 \cdot 10^3$ кг·м²/с

Напряжение (механическое)

Килограмм-сила на квадратный миллиметр (kgf/mm², кгс/мм²); 1 кгс/мм²=$9{,}80665 \cdot 10^6$ Па (точно)
Килопонд на квадратный миллиметр (kp/mm², —); 1 килопонд на кв. мм=$9{,}80665 \cdot 10^6$ Па (точно)

Работа, энергия

Ватт-час (W·h, Вт·ч); 1 Вт·ч=3600 Дж
Киловатт-час (kW·h, кВт·ч); 1 кВт·ч=$3{,}6 \cdot 10^6$ Дж
Килограмм-сила-метр (kgf·m, кгс·м); 1 кгс·м=9,80665 Дж
Килопонд-метр (kp·m, —); 1 килопонд-метр=9,80665 Дж
Литр-атмосфера (—, л·атм); 1 л·атм=101,328 Дж
Лошадиная сила-час (—, л.с.ч.); 1 л.с.ч.=$2{,}64780 \cdot 10^6$ Дж
Фунт-сила-фут (lbf·ft, —); 1 фунт-сила-фут=1,35582 Дж
Эрг (erg, эрг); 1 эрг=$1 \cdot 10^{-7}$ Дж

Мощность

Калория в секунду (cal/s, кал/с); 1 кал/с=4,1868 Вт
Килограмм-сила-метр в секунду (kgf·m/s, кгс·м/с); 1 кгс·м/с=9,80665 Вт
Лошадиная сила (—, л.с.); 1 л. с.=735,499 Вт
Лошадиная сила (Великобрит.) (hp, —); 1 лошадиная сила (Великобрит.)=745,700 Вт
Эрг в секунду (erg/s, эрг/с); 1 эрг/с=$1 \cdot 10^{-7}$ Вт

Динамическая вязкость

Килограмм-сила-секуида на квадратный метр (kgf·s/m², кгс·с/м²); 1 кгс·с/м²=9,80665 Па·с
Паундаль-секунда на квадратный фут (pdl·s/ft², —); 1 пауидаль-секунда на кв. фут=1,48816 Па·с
Пуаз (P, П); 1 П=0,1 Па·с
Фунт-сила-секунда на квадратный метр (lbf·s/m², —); 1 фунт-сила-секунда на кв. метр=47,8803 Па·с

Кинематическая вязкость

Квадратный метр на час (m²/h, м²/ч); 1 м²/ч=2,77 (7)$\times$ $\times 10^{-4}$ м²/с
Квадратный фут на секунду (ft²/s, —); 1 кв. фут на секунду=0,0929030 м²/с
Квадратный фут на час (ft²/h, —); 1 кв. фут на час=$2{,}58064 \cdot 10^{-5}$ м²/с
Стокс (St, Ст); 1 Ст=$1 \cdot 10^{-4}$ м²/с

Объемный расход

Кубический дюйм в секунду (in³/s, —); 1 куб. дюйм в секунду=$1{,}6387 \cdot 10^{-5}$ м³/с
Кубический сантиметр в секунду (cm³/s, см³/с); 1 см³/с=$1 \cdot 10^{-6}$ м³/с
Кубический фут в секунду (ft³/s, —), 1 кубический фут в секунду=0,0283168 м³/с
Литр в минуту (l/min, л/мин); 1 л/мин=$1{,}66(6) \cdot 10^{-5}$ м³/с
Литр в час (l/h, л/ч); 1 л/ч=$2{,}77(7) \cdot 10^{-8}$ м³/с

Количество теплоты (теплота)

Британская тепловая единица (Btu, —); 1 британскаи тепловая единица=$1{,}05506 \cdot 10^3$ Дж
Калории международная (cal. кал); 1 кал=4,1868 Дж (точно)
Калория пятнадцатиградусная (cal_{15}, $кал_{15}$); 1 $кал_{15}$=4,1855 Дж
Калория термохимическая (cal_{th}, $кал_{тх}$); 1 $кал_{тх}$=4,1840 Дж
Термия (th, —); 1 термия=$4{,}1868 \cdot 10^3$ Дж

Удельная теплоемкость

Калория на грамм-градус Цельсия [cal/(g·°C), кал/(г·°C)]; 1 кал/(г·°C)=$4{,}1868 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)
Килокалория на килограмм-градус Цельсия [kcal/(kg·°C), ккал/(кг·°C)]; 1 ккал/(кг·°C)=$4{,}1868 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К)

Молярная теплоемкость

Калория на моль-градус Цельсия [cal/mol·°C), кал/(моль·°C)]; 1 кал/моль·°C)=4,1868 Дж/(моль·К)

Теплопроводность (коэффициент теплопроводности)

Британская тепловая единица в секунду-фут-градус Фаренгейта [Btu/(s·ft·deg F, —]; 1 брнтанская тепловая единица в секунду-фут-градус Фаренгейта=$6{,}23064 \cdot 10^3$ Вт/(м·К)
Калория в секунду на сантиметр-градус Цельсия [cal/(s·cm°C), кал/(с·см·°С)]; 1 кал/(с·см·°С)=418,7 Вт/(м·К)
Килокалория в час на метр-градус Цельсия [kcal/(h·m·°C), ккал/(ч·м·°С)]; 1 ккал/(ч·м·°С)=1,163 Вт/(м·К)
Эрг в секунду на сантиметр-Кельвин [erg/(s·m·К), эрг/(с·см·К)]; 1 эрг/(с·см·К)=$1 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·К)

Электрический заряд

Фарадей (F, Ф); 1 Ф=96484,56 Кл
Фраиклин (Fr, Фр); 1 Фр=$3{,}33564 \cdot 10^{-10}$ Кл

Напряженность электрического поля

Вольт на сантиметр (V/cm, В/см); 1 В/см=100 В/м

Электрический момент

Дебай (D, D); 1 D=3,33564·10^{-30} Кл·м

Плотность тока

Ампер на квадратный миллиметр (A/mm^2, А/мм^2); 1 А/мм^2=1·10^6 А/м^2

Удельное электрическое сопротивление

Ом-квадратный миллиметр на метр (Ω·mm^2/m, Ом××мм^2/м); 1 Ом·мм^2/м=1·10^{-6} Ом·м

Ом-сантиметр (Ω·cm, Ом·см); 1 Ом·см=0,01 Ом·м

Удельная электрическая проводимость

Ом в минус первой степени-сантиметр в минус первой степени (Ω^{-1}·cm^{-1}, Ом$^{-1}$·см$^{-1}$); 1 Ом$^{-1}$·см$^{-1}$=100 См/м

Метр на ом-квадратный миллиметр [m/(Ω·mm^2), м/(Ом·мм^2)]; 1 м/(Ом·мм^2)=1·10^6 См/м

Магнитная индукция

Гаусс (Gs, Гс); 1 Гс=1·10^{-4} Тл

Вебер на квадратный сантиметр (Wb/cm^2, Вб/см^2); 1 Вб/см^2=1·10^4 Тл

Магнитный поток

Максвелл (Мх, Мкс); 1 Мкс=1·10^{-8} Вб

Напряженность магнитного поля

Эрстед (Oe, Э); 1 Э=79,5775 А/м

Ампер на сантиметр (А/cm, А/см); 1 А/см=100 А/м

Ампер-виток на сантиметр (—, Ав/см); 1 Ав/см=100 А/м

Магнитодвижущая сила

Гильберт (Gb, Гб); 1 Гб=0,795775 А

Ампер-виток (—, Ав): 1 Ав=1 А

Магнитный момент

Магнетон Бора (μ_B μ_B); 1 μ_B=9,274078·10^{-24} А·м^2

Яркость

Апостильб (asb, асб); 1 асб=0,318310 кд/м^2

Ламберт (Lb, Лб); 1 Лб=0,318310·10^4 кд/м^2

Стильб (sb, сб); 1 сб=1·10^4 кд/м^2

Поглощенная доза

Рад (rad, рад); 1 рад=0,01 Гр

Эквивалентная доза

Бэр (rem, бэр); 1 бэр=0,01 Дж/кг

Активность нуклида в радиоактивном источнике

Кюри (Ci, Ки); 1 Ки=3,700·10^{10} Бк (точно)

Экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучений

Рентген (R, Р); 1 Р=2,58·10^{-4} Кл/кг (точно)

1.14. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

На внутренней стороне обложки справочника приведены значения фундаментальных физических постоянных и некоторые соотношения между различными единицами, которые рекомендованы рабочей группой международного Комитета по константам для науки и технологии (COD ATA)* в 1986 г. [15].

Новый список самосогласованных фундаментальных постоянных отлнчается от рекомендованных Государственной службой стандартных справочных данных Государственного комитета стандартов при СМ СССР [18] тем, что в него включены два типа констант: стохастические, как обычно, и точные. К точным константам отнесена, например, скорость света в вакууме C≡299 792 458 м/с, значенне которой следует из нового определения метра [20]. В список включены уточненное значение гравитационной постоянной G=6,672 59 (85)××10^{-11}Н·м^2·кг$^{-2}$ [19], оцененные значення масс [16, 17] и некоторые другие постоянные.

При составлении таблиц использовались также ГОСТ 8.417—81 Единицы физических величин, Документ UIP-20-1978: Обозначения, единицы измерения и терминология в физике [21] и другие пособия [14, 15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бурдун Г. Д.** Справочник по Международной системе единиц. М.: Изд-во стандартов, 1980.
2. **ГОСТ** 8.417—81 (СТ СЭВ 1052—78) ГСИ: Единицы физнческих величин.
3. **ГОСТ** 15484—81. Излучення ионнзирующие и их измерення: Термины и определения.
4. **РД** 50—160—79. Методические указания: Внедрение и примененне СТ СЭВ 1052—78: Метрологня. Единицы физических величин.
5. **РД** 50—454—84. Методические указания: Внедренне и прнменение ГОСТ 8.417—81: ГСИ. Единицы физических величнн в области ионизирующих излучений.
6. **Иванов В. И., Машкович В. П., Центер Э. М.** Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике. М.: Энергоиздат, 1981.
7. **Сена Л. А.** Единицы физических величнн и их размерности. М.: Наука, 1977.
8. **Чертов А. Г.** Единицы фнзических величин. М.: Высшая школа, 1977.
9. **Широков К. П., Богуславский М. Г.** Международная система единиц. М.: Изд-во стандартов, 1984.
10. **Фундаментальные** физические константы: ГСССД 1—76/Издание официальное. М.: Изд-во стандартов, 1976.
11. **Luther G. G., Towler W. R.**//Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 48. № 3. P. 121—123.
12. **Petley B. W.**//Nature. 1983. Vol. 303. № 5916. P. 373—376.
13. **Документ** UIP—20—1978: Обозначения, единицы измерения и терминология в физике//Успехи физ. наук. 1979. Т. 129. Вып. 2. С. 289—338.

14. **Физический** энциклопедический словарь/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1984.
15. **Cohen E. R., Taylor B. N.** The 1986 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1987. vol. 92. № 2. P. 85—95.
16. **Reviews** of particle properties//Rev. Mod. Phys 1984. Vol. 56. № 2. Pt. II. P. S2—S304.
17. **Wapstra A. H., Audi G.** The 1983 Atomic Mass Evaluation. 1985. A432. № 1. P. 1—362.
18. **Фундаментальные** физические константы. ГСССД 1—76/Издание официальное. М.: Изд-во стандартов, 1976.
19. **Luther G. G., Towler W. R.** Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 48, No 3. P. 121—123.
20. **Petley B. W.** Nature, 1983. Vol. 303. No 5916. P. 373—376.
21. **Документ UIP-20-1978:** Обозначения, единицы измерения и терминология в физике. УФН. 1979. Т. 129. Вып. 2. С. 289—338.

ГЛАВА 2

СИММЕТРИЙНОЕ И ТЕНЗОРНОЕ ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ

Ю. В. Писаревский

2.1. СИММЕТРИЯ КРИСТАЛЛОВ [1, 2]

Термодинамнчески равновесное состояние твердого тела — кристаллическое. Кристаллы — тела, обладающие упорядоченной трехмерно-периодической пространственной атомной структурой. Множество природных и синтетических твердых веществ (металлы, сплавы, минералы и др.) состоят из очень мелких произвольно ориентированных кристалликов. Если мелкие кристаллы ориентированы хаотическн, их называют *поликристаллами.* При преимущественной ориентацни кристалликов твердое тело образует *текстуру.* В последнее время резко возросли масштабы получения и применения отдельных крупных кристаллов, которые часто называют *монокристаллми.*

Свойства кристаллов определяются особенностями строящих кристаллическую решетку атомов и молекул, силамн связей и взаимным расположением в пространстве — *структурой кристаллов.*

Очень часто кристаллическая решетка имеет различные элементы симметрии, соответствующие определенным операциям в трехмерном пространстве. Выполнение этих операций в кристалле оставляет решетку неизменной. Между симметрией кристаллической решетки и симметрией тех или иных свойств существует четкая взанмосвязь. Важно учитывать, что относительно различных свойств и в зависимости от уровня рассмотрения — микроскопического или макроскопического, в статике или динамике симметрия объекта может изменяться и по-разному описываться. При этом в каждом случае будет определенная иерархия групп симметрии (отличающихся совокупностью элементов симметрии).

Идеальные кристаллы характеризуются свойствами однородности и анизотропии. Однородность определяет неизменность свойств при перемещении точки измерения на расстояние, кратное периодам решетки. Анизотропия — зависимость свойств от направленнй. Она зависит от группы симметрии. Принимая среду однородной, пренебрегают влиянием дефектов решетки: блоков, дислокаций и т. п. В сравнительно сложных соединениях от точки к точке в той или иной степени изменяется стехиометрия (т. е. локальный химический состав кристалла). Например, в кристалле ниобата литня соотношение между оксидами лития и ниобия может изменяться иногда даже от 0,9 до 1,1. От дефектов и состава зависят также свойства кристаллов, но так как эта зависимость сравнительно слабая, приведенные свойства приписываются однородному кристаллу с идеализированным составом.

Основным свойством пространственной кристаллической решетки является трехмерная периодичность, когда можно выделить три некомпланарных вектора **a, в, с,** любая линейная комбинация которых переводит точку решетки в эквивалентную ей, т. е. вектор $\mathbf{M}=A\mathbf{a}+B\mathbf{в}+C\mathbf{c}$, где A, B, C — любые целые числа, переводит точку решетки в эквивалентную. Эту операцию называют *трансляцией.* Параллелепипед, построенный на векторах **a. b, с,** называют *параллелепипедом повторяемости* или *элементарной ячейкой.* Помимо трансляций в большом числе кристаллических решеток имеются и некоторые элементы симметрии.

Поворотные оси. Поворот на угол $\alpha=2\pi/N$, который переводит любой элемент кристаллнческой решетки в эквивалентное состояние, определяет наличие оси симметрии. Эти оси обозначают N, значение которой определяет порядок оси. В кристаллах возможны поворотные оси 1, 2, 3, 4, 6-го порядков. Операция I соответствует повороту иа 2π.

Плоскость зеркального отражения (плоскость симметрии). Соответствующую операцию обозначают буквой m (от слова mirror — зеркало) или символом $\bar{2}$, так как эта операция представляет собой и инверсионный поворот второго порядка.

Инверсионно-поворотные оси. Обозначаются цифрой, отвечающей порядку поворота, с чертой сверху: $\bar{1}$, $\bar{2}$, $\bar{3}$, $\bar{4}$, $\bar{6}$. Важнейший частный случай — ось $\bar{1}$ — центр симметрии.

Зеркально-поворотные оси. Совпадают с инверсионно-поворотными осями, но с элементарным углом поворота, отличающимся от них на π. Зеркально-поворотные оси обозначают цифрой, отвечающей порядку поворота, со знаком тильды ($\sim$) наверху: $\tilde{1}$ $\tilde{2}$, $\tilde{3}$, $\tilde{4}$ $\tilde{6}$. Инверсионные и зеркально-поворотные оси связаны так:

$$\tilde{N}_\alpha = \bar{N}_{\alpha-\pi} \text{ или } \quad \tilde{1} = \bar{2} = m; \ \bar{3} = \tilde{6}; \quad \bar{4} = \tilde{4}; \ \bar{6} = \tilde{3}; \ \bar{1} = \tilde{2}.$$

Винтовые оси. Эти оси имеют угловую и трансляционную компоненты:

$$\alpha_s = \frac{2\pi}{N}, \quad N = 2, \ 3, \ 4, \ 6;$$

$$t_s = \frac{q}{N} t, \quad q = 1, \ 2, \ 3, \ 4, \ 5.$$

Операция означает, что вместе с поворотом вокруг данной оси осуществляется трансляция вдоль этой же оси. Общий символ винтовых осей — N_q.

Плоскости скользящего отражения. Операция подразумевает отражение относительно данной плоскости с одновременной трансляцией вдоль одного из направлений, лежащих в плоскости. Так как двукратное повторение данной операции сводится просто к удвоенному переносу вдоль направления скольжения, то удвоенная трансляционная компонента совпадает с одним из периодов решетки.

Такие операции обозначают a, b или c соответственно нанменованию той оси элементарной ячейки, вдоль которой происходит скольжение. Так, для операции a трансляционная компонента a_1 равна $a/2$, где a — период решетки (один из характерных размеров элементарной ячейки). В общем случае возможны операции скользящего отражения и вдоль диагоналей граней или вдоль пространственной диагонали элементарной ячейки

$$t' = (b + c)/2; \quad t' = (c \pm a)/4; \quad t' = (a \pm b \pm c)/4.$$

Полярность. Одной из важнейших характеристик направлений может быть равнозиачность их противоположных сторон. Если прямая преобразуется в себя какой-либо операцией, меняющей местами противоположные направления этой прямой, то она неполярна. К элементам, соответствующим таким операциям, относится центр симметрии, ось четного порядка или плоскость симметрии (последние две операции — в случае перпендикулярности указанных элементов данной прямой).

Если указанных операций нет, то направление полярно. В кристаллах только для полярных направлений может наблюдаться полярность свойств.

Сингонии. Кристаллические решетки классифицируются по наличию в иих различных элементов симметрии. Прежде всего их можно разделить на семь типов по форме параллелепипедов повторяемости (элементарной ячейки). Эти типы называют сингониями: триклинной, моноклинной, ромбической, тригональной, тетрагональной, гексагональной и кубической.

Решетки Браве. Элементарные ячейки разлнчаются не только сингонией, но и возможным расположением узлов в центре граней или объема параллелепипеда повторяемости. Таким образом получается 14 решеток Браве. В некоторых из них иет дополнительных узлов — такие решетки иазывают *примитивными* — P. Другие относятся к гранецентрированным A, B или C (A, B, C — грани параллелепипеда повторяемости). Центрировку по всем граням одновременно обозначают символом F, а центрировку по объему — I.

Таблица 2.1. **Решетки Браве**

Сингония и параметры ячейки	Тип ячейки (центрированность)	Обозначения по Шенфлису	Обозначения международные
Триклинная, $a \neq b \neq c$; $\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90°$	Примитивная P	Γ_t	$P\,\bar{1}$
Моноклинная, $a \neq b \neq c$; $\alpha = \gamma = 90°$; $\beta \neq 90°$	Примитивная P	Γ_m	$P\,2/m$
	Гранецентрированная B (C)	Γ_m^b	$B\,(C)\,2/m$
Ромбическая, $a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	Примитивная P	Γ_0	$Pmmm$
	Гранецентрированная C (A, B)	Γ_0	$C\,(B,A)mmm$
	Центрированная по всем граням F	Γ_0^f	$Fmmm$
	Объемноцентрированная I	Γ_0^v	$Immm$
Тригональная, $a = b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$	Примитивная P (R)	Γ_{rh}	$R\,\bar{3}m$
Тетрагональная, $a = b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	Примитивная P	Γ_q	$P\,4/mmm$
	Объемноцентрированная I	Γ_q^v	$I\,4/mmm$
Гексагональная, $\gamma = 120°$ $a = b \neq c$; $\alpha = \beta = 90°$	Примитивная P	Γ_h	$P\,6/mmm$
Кубическая, $a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$	Примитивная P	Γ_c	$Pm\,\bar{3}m$
	Центрированная по всем граням F	Γ_c^v	$Fm\,3m$
	Объемноцентрированная I	Γ_c^f	$Im\,3m$

Точечные группы. Кристаллографические классы

При изучении макроскопических физических свойств представляет интерес не относительное положение элементов структуры, а только их ориентация. Поэтому для описания макроскопических свойств, когда кристалл можно представить в виде сплошной среды, нужно знать все комбинации элементов симметрии, отличающиеся набором и взаимной ориентацией этих элементов.

При этом не принимаются во внимание относительное положение элементов структуры, а также трансляции, связанные с плоскостями скольжения и винтовыми осями, т. е. учитываются только следующие элементы симметрии: а) центр симметрии $\bar{1}$; б) зеркальная плоскость m; в) поворотные оси первого, второго, третьего, четвертого и шестого порядков; г) инверсионные оси первого, второго, третьего, четвертого и шестого порядков.

Возможны 32 различные комбинации вышеуказаиных элементов симметрии — 32 гочечные группы. Они соответствуют 32 кристаллографическим классам. Эти классы объединяются в семь кристаллографичеких групп по сингониям:

1. Триклинная сингония — имеются только оси первого порядка (поворотные или инверсионные).
2. Моноклинная сингония — имеется только одна ось второго порядка (поворотная или инверсионная) или только одна зеркальная плоскость.
3. Ромбическая сингония — имеются три взаимно перпендикулярные оси второго порядка (поворотные или инверсионные), зеркальные плоскости, но нет осей более высокого порядка.
4. Тригональная сингония — имеется одна ось третьего порядка (поворотная или инверсионная).

Таблица 2.2. **Обозначения и названия 32 точечных групп (классов) симметрии**

Сингония	Обозначение			Формула симметрии	Название класса
	международное	по Шубникову	по Шенфлису		
Триклинная	1	1	C_1	L^1	Моноэдрический
	$\bar{1}$	$\widetilde{2}$	$C_i = S_2$	C	Пинакоидальный
Моноклинная	2	2	C_2	L^2	Диэдрический осевой
	m	m	$C_{1h} = C_S$	P	Диэдрический безосный
	$2/m$	$2:m$	C_{2h}	L^2PC	Призматический
Ромбическая	222	2:2	$D_2 = V$	$3L^2$	Ромбо-тетраэдрический
	mm^2	$2 \cdot m$	C_{2V}	$L^2 2P$	Ромбо-пирамидальный
	mmm	$m \cdot 2 \cdot m$	D_{2h}	$3L^2 3PC$	Ромбо-дипирамидальный
Тригональная	3	3	C_3	3	Тригонально-пирамидальный
	32	3:2	D_3	$L^3 3L^2$	Тригонально-трапецоэдрический
	$3m$	$3 \cdot m$	C_{3V}	$L^3 3P$	Дитригонально-пирамидальный
	$\bar{3}$	$\widetilde{6}$	$C_{3i} = S_6$	$L_6^3 6C$	Ромбоэдрический
	$\bar{3}m$	$\widetilde{6}m$	D_{3d}	$L_6^3 3L^2 3PC$	Дитригонально-скаленоэдрический
Тетрагональная	4	4	C_4	L^4	Тетрагонально-пирамидальный
	422	4:2	D_4	$L^4 4L^2$	Тетрагонально-трапецоэдрический
	$4/m$	$4:m$	C_{4h}	$L^4 PC$	Тетрагонально-дипирамидальный
	$4mm$	$4 \cdot m$	C_{4V}	$L^4 4P$	Дитетрагонально-пирамидальный
	$4/mmm$	$m \cdot 4:m$	D_{4h}	$L^4 4L^2 5PC$	Дитетрагонально-дипирамидальный
	$\bar{4}$	$\widetilde{4}$	S_4	L_4^2	Тетрагонально-тетраэдрический
	$\bar{4}2m$	$\widetilde{4} \cdot m$	$D_{2d} = V_d$	$L_4^2 2L^2 2P$	Тетрагонально-скаленоэдрический
Гексагональная	$\bar{6}$	$3:m$	C_{3h}	$L^3 P$	Тригонально-дипирамидальный
	$\bar{6}m2$	$m \cdot 3:m$	D_{3h}	$L^3 3L^2 4P$	Дитригонально-дипирамидальный
	6	6	C_6	L^6	Гексагонально-пирамидальный
	622	6:2	D_6	$L^6 6L^2$	Гексагонально-трапецоэдрический
	$6/m$	$6:m$	C_{6h}	$L^6 PC$	Гексагонально-дипирамидальный
	$6mm$	$6 \cdot m$	C_{6V}	$L^6 6P$	Дигексагонально-пирамидальный
	$6/mm$	$m \cdot 6:m$	D_{6h}	$L^6 6L^2 7PC$	Дигексагонально-дипирамидальный
Кубическая	23	3/2	T	$3L^2 4L^3$	Тритетраэдрический
	$m\bar{3}$	$\widetilde{6}/2$	T_h	$3L^2 4L_6^3 3PC$	Дидодекаэдрический
	$\bar{4}3m$	$3/\widetilde{4}$	T_d	$3L_4^2 4L^3 6P$	Гексатетраэдрический
	432	3/4	O	$3L^4 4L^3 6L^2$	Триоктаэдрический
	$m3m$	$\widetilde{6}/4$	O_h	$3L^4 4L_6^3 6L^2 9PC$	Гексоктаэдрический

Примечание. В международной и шубниковской системах обозначений приведены элементы симметрии, из которых можно вывести остальные. В графе «Формула симметрии» приведены все элементы симметрии данного класса: L — оси, C — центр, P — плоскость симметрии; перед каждым символом стоит число соответствующих элементов.

5. Тетрагональная сингония — имеется одна ось четвертого порядка (поворотная или инверсионная).

6. Гексагональная сингония — имеется одна ось шестого порядка (поворотная или инверсионная).

7. Кубическая сингония — имеются четыре оси третьего порядка, расположенные параллельно объемным диагоналям куба.

Пространственные группы симметрии

Пространственные группы — это бесконечные группы, образуемые комбинацией решеток Браве с операциями симметрии точечных групп, а также с плоскостями отражения и винтовыми осями. Всего для 32 классов точечной симметрии существуют 230 пространственных групп симметрии. В качестве примера в табл. 2.3 приведены пространственные группы, соответствующие точечной группе C_{2v}. Обозначение пространственных групп по Шенфлису является просто обозначением точечной группы с установленным порядковым номером пространственной группы внутри класса.

В международные обозначения входят символ решетки Браве и операции (элементы) симметрии в определенном трехпозиционном порядке в соответствии с символом точечной группы и выбором кристаллографических осей X, Y, Z (о выборе осей см. ниже).

Таблица 2.3. **Пространственные группы для класса C_{2v}**

Решетка Браве	Простые группы	Группы с плоскостями скользящего отражения	Группы с винтовыми осями
P (примнтивиая)	$C_{2v}^1 - Pmm\,2$	$C_{2v}^3 - P\,cc\,2$ (2); $C_{2v}^4 - Pma\,2$ (2)	$C_{2v}^2 - Pmc\,2_1$ (2); $C_{2v}^5 - Pca\,2_1$ (4)
		$C_{2v}^6 - Pnc\,2$ (4); $C_{2v}^8 - Pba\,2$ (4)	$C_{2v}^7 - Pmn\,2_1$ (4); $C_{2v}^9 - Pna\,2_1$ (8)
		$C_{2v}^{10} - Pnn\,2$ (8)	
C (гранецентрированная)	$C_{2v}^{13} - Ccc\,2$ (2)	$C_{2v}^{13} - Ccc\,2$ (2)	$C_{2v}^{12} - Cmc\,2_1$ (2)
A (гранецентрированная)	$C_{2v}^{14}\,Amm\,2$	$C_{2v}^{15} - Abm\,2$ (4); $C_{2v}^{16} - Ama\,2$ (2)	—
		$C_{2v}^{17} - Aba\,2$ (4)	
F (гранецентрированная по трем граням)	$C_2^{18} - Fmm\,2$	$C_{2v}^{19} - Fdd\,2$ (8)	—
I (объемноцентрнрованиая)	$C_{2v}^{20} - Imm\,2$	$C_{2v}^{21} - Iba\,2$ (8); $C_{2v}^{22} - Ima\,2$ (8)	—

Примечание. m и n — плоскости симметрии; a, b, c — плоскости скользящего отражения: 2_1 — винтовые оси. Цифры в скобках указывают, во сколько раз следует увеличить объем элементарной ячейки простой группы, чтобы получить указанную группу.

Магнитная симметрия [4]

Для магнитных материалов находящиеся в эквивалентных кристаллографических позициях атомы могут иметь различно ориентированный в пространстве магнитный момент. На рис. 2.1 схематически показаны различные виды неколлинеарных магнитных структур.

Для учета ориентации магнитного момента в магнитной симметрии к описаным выше элементам симметрии добавляют R-**преобразование**, изменяющее направление магнитного момента атома или группы атомов на противоположное.

В отношении симметрии данная ситуация описывается шубниковскими группами антисимметрии (черно-белой симметрии, см. табл. 2.4).

В группу GI' входят кристаллы, у которых среднее по времени значение плотности магнитного момента равно нулю (диамагнетики и парамагнетики). Остальные 90 классов имеют магнитную структуру. Среди них 32 класса (группа G) не содержат операции R — это полярные (одноцветные) классы. В качестве примера тип структур для этих классов показан на рис. 2.1,*а* и *б*. Оставшиеся 58 классов (группа G') содержат операцию R в сочетании с другими операциями симметрии.

Таблица 2.4. **Соотношение между группами антисимметрии и магнитной симметрии**

G — полярные (одноцветные)	G' — смешанной полярности (двухцветные)	GI' — нейтральные (серые)	Всего классов
$\underline{13} + 19 = 32$ (230)	$\underline{18} + 40 = 58$ (1191)	32 (230)	122 (1651)

Примечание. Снизу подчеркнуто количество классов, допускающих спонтанную намагниченность I_S. В скобках приведено число соответствующих пространственных групп.

В табл. 2.5 приведены магнитные классы симметрии. Видно, что 31 класс допускает спонтанную намагниченность. Кристаллы, относящиеся к этим классам, являются ферро- или ферримагнетиками. К остальным 59 классам принадлежат антиферромагнитные кристаллы.

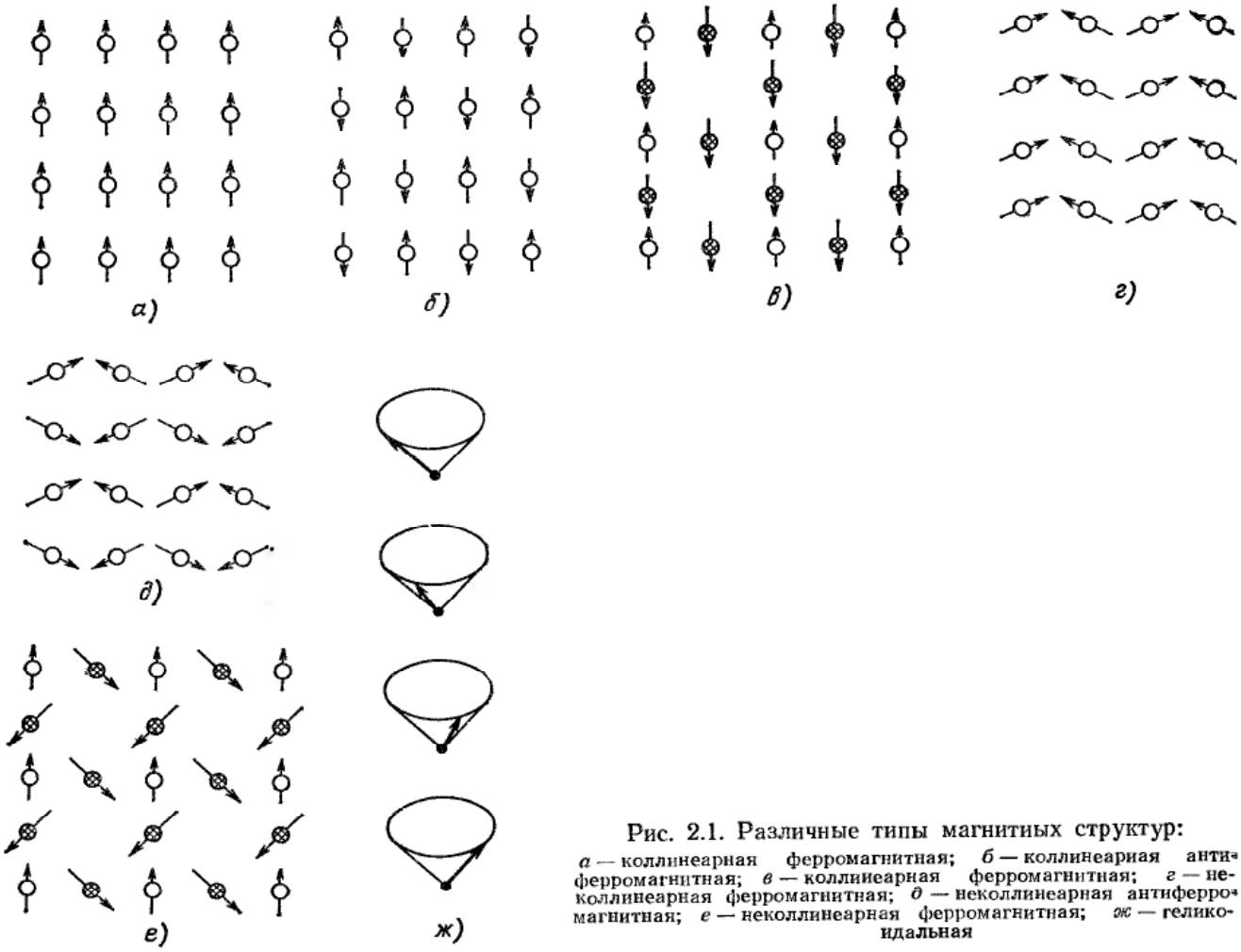


Рис. 2.1. Различные типы магнитных структур:
а — коллинеарная ферромагнитная; *б* — коллинеарная антиферромагнитная; *в* — коллинеарная ферромагнитная; *г* — неколлинеарная ферромагнитная; *д* — неколлинеарная антиферромагнитная; *е* — неколлинеарная ферромагнитная; *ж* — геликоидальная

Таблица 2.5. **Магнитные классы симметрии**

Сингония	Группа G'	Группа G
Триклинная	$\overline{1}$	$\underline{1}$, $\underline{\overline{1}}$
Моноклинная	$\underline{2'}$, $\underline{m}$, $\underline{2'/m'}$, $2/m'$, $2'/m$	$\underline{2}$, $\underline{m}$, $\underline{2/m}$
Тетрагональная	$4'$, $\overline{4}'$, $4'/m$, $4/m'$, $4'22$, $\underline{42'2}$, $4'mm'$, $\underline{4m'm'}$, $\overline{4}'2m'$, $\overline{4}'2'm$, $\underline{\overline{4}2'm'}$, $4'/m'mm$, $\underline{4/mm'm'}$, $4/m'm'm'$, $4/m'mm$, $4'/m'mm'$	$\underline{4}$, $\underline{\overline{4}}$, $\underline{4/m}$, 422, $4mm$, $\overline{4}2m$, $4/mmm$
Тригональная	$\overline{3}'$, $\underline{32'}$, $\underline{3m'}$, $\underline{\overline{3}m'}$, $\overline{3}'m'$, $\overline{3}'m$	$\underline{3}$, $\underline{\overline{3}}$, 32, $3m$, $\overline{3}m$
Гексагональная	$6'$, $\overline{6}'$, $6'/m'$, $6/m'$, $6'/m$, $6'22'$, $\underline{62'2'}$, $6'mm'$, $\underline{6m'm'}$, $\overline{6}'m'2$, $\overline{6}m'2'$, $\underline{\overline{6}'m'2'}$, $6'/m'mm'$, $\underline{6/mm'm'}$, $6/mmm$, $6/m'mm$, $6'/mmm'$	$\underline{6}$, $\underline{\overline{6}}$, $\underline{6/m}$, 622, $6mm$, $6m2$, $6/mmm$
Кубическая	$m'3$, $4'32$, $\overline{4}'3m'$, $m3m'$, $m'3m'$, $m'3m$	23, $m3$, 432, $\overline{4}3m$, $m3m$

Примечание. Элементы симметрии, содержащие операцию R, отмечены штрихом. Классы, допускающие спонтанную намагниченность, подчеркнуты.

Предельные группы

Есть класс веществ, где наблюдается частичная упорядоченность. К нему относятся, в частности, текстуры.

В качестве примера таких веществ можно назвать древесину, пьезоэлектрические керамики и др. Симметрийные свойства таких сред описывают с помощью предельных (непрерывных) точечных групп симметрии, которые содержат операции бесконечно малых поворотов, т. е. оси симметрии бесконечного порядка (∞). Таких групп семь: ∞, ∞mm, $\infty 22$, ∞/m, ∞/mmm, ∞/∞, $\infty/\infty mm$.

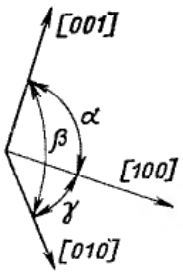
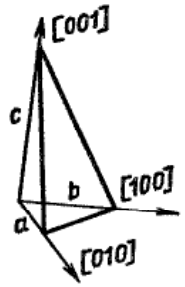
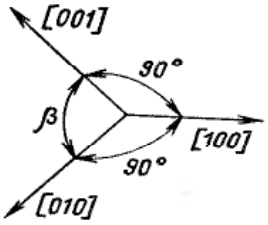
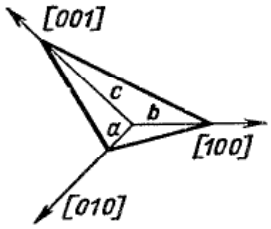
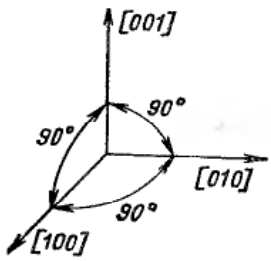
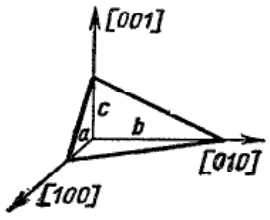
Кристаллографическая система координат

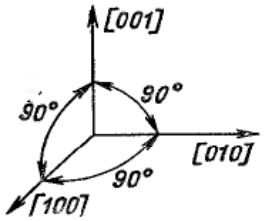
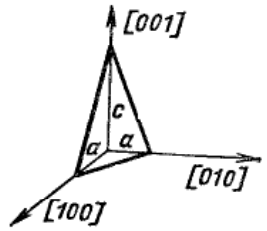
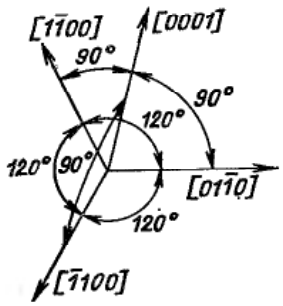
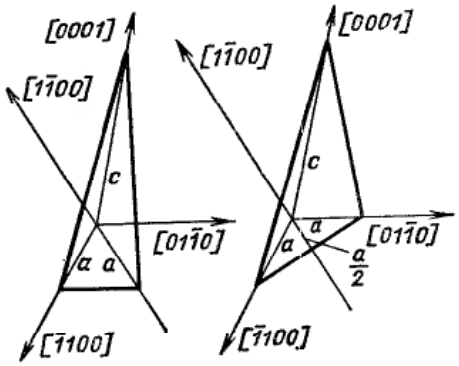
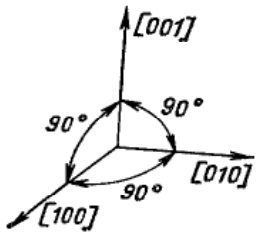
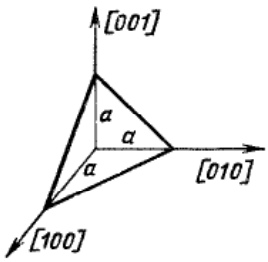
Каждая решетка однозначно определяется своей элементарной ячейкой. Но в одной и той же решетке возможен выбор элементарной ячейки бесконечным числом способов.

Однако во всех классах, исключая относящиеся к триклинной и моноклинной сингониям, может быть выбрана единственная ячейка, однозначно описывающая одинаковые решетки, — это параллелепипед Браве.

Естественно, кристаллографическую систему координат связывают с тройкой координатных некомпланарных векторов $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$, $\mathbf{a}_3$, направленных вдоль ребер параллелепипеда Браве, а началом координат является одна из вершин этого параллелепипеда. При этом

Таблица 2.6. **Кристаллографическая система координат**

Сингония	Кристаллографические оси	Единичная грань
Триклинная	Оси [100], [010] параллельны действительным или возможным ребрам кристалла. Ось [001], параллельная оси наиболее развитого пояса, ставится вертикально; $\alpha \neq \beta \neq \gamma$: 	Единичная грань отсекает на кристаллографических осях неравные отрезки $a \neq b \neq c$: 
Моноклинная	Ось [010] совмещается с осью 2 или с нормалью к m и располагается горизонтально. Оси [100] и [001] выбираются в плоскости, перпендикулярной [010], параллельно действительным или возможным осям кристалла, ось [001] — вертикально; $\alpha = \gamma = 90° \neq \beta$: 	Единичная грань отсекает на кристаллографических осях неравные отрезки; $a \neq b \neq c$: 
Ромбическая	Оси [100], [010], [001] совмещаются с тремя осями 2 или с одной осью 2 и нормалями к двум плоскостям; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$: 	Единичная грань отсекает на кристаллографических осях неравные отрезки; $a \neq b \neq c$: 

Сингония	Кристаллографические оси	Единичная грань
Тетрагональная	За ось [001] принимается ось 4 или $\bar{4}$. Оси [100] и [010] выбираются в плоскости, перпендикулярной [001], или по осям 2, или по перпендикулярам к плоскостям m, или по направлениям, параллельным действительным или возможным ребрам кристалла; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$: 	Единичная грань отсекает на двух горизонтальных осях равные отрезки и не равный им отрезок по вертикальной оси [001]; $a = b \neq c$: 
Тригональная и гексагональная	Всего четыре оси. За ось [0001] принимается ось высшего (третьего или шестого) порядка. Оси $[1\bar{1}00]$, $[\bar{1}100]$ и $[0\bar{1}10]$ выбираются в плоскости, перпендикулярной оси [0001], или по оси 2, или по нормали к плоскостям m, или по направлениям, параллельным действительным или возможным ребрам кристалла 	Единичная грань отсекает на двух горизонтальных осях равные отрезки и неравный отрезок по [0001]. Если грань отсекает равные отрезки на соседних осях, ее символ может быть (*А*) $[10\bar{1}1]$, или $[\bar{1}101]$, или $[01\bar{1}1]$, если через одну (*Б*), то ее символ может быть $[11\bar{2}1]$, или $[1\bar{2}11]$, или $[\bar{2}111]$ 
Кубическая	Оси совмещаются с тремя осями 4, $\bar{4}$ или 2 (в случае отсутствия четвертых осей); $\alpha = \beta = \gamma = 90°$: 	Единичная грань отсекает на кристаллографических осях равные отрезки: $a = b = c$: 

вектор $\mathbf{hkl} = h\mathbf{a}_1 + k\mathbf{a}_2 + l\mathbf{a}_3$

называют кристаллографической осью и обозначают $[h, k, l]$. Например, пространственная диагональ параллелепипеда Браве представляет направление [111].

Соответствующую кристаллографическому направлению плоскость обозначают теми же индексами, но в круглых скобках $(h\ k\ l)$. В табл. 2.6 приведена установка кристаллографических осей для различных сингоний.

Таблица 2.7. **Правила выбора кристаллографической системы координат**

Сингония	Ориентация относительно кристаллографических осей	Ориентация относительно элементов симметрии
Триклинная	$Z \parallel [001]$, или $Y \parallel [010]$, или $X \parallel [100]$	—
Моноклинная	$Y \parallel [010]$ и $X \parallel [100]$ (или $Z \parallel [001]$). Иногда $Z \parallel [010]$ и $X \parallel [100]$ (или $Y \parallel [001]$)	Ось Y параллельна оси 2 или нормали к плоскости m. Иногда ось 2 параллельна оси Z
Ромбическая	$Z \parallel [001]$, $Y \parallel [010]$, $X \parallel [100]$	Ось [001] параллельна оси 2. Оси X и Y параллельны другим осям 2 или нормалям к m
Тригональная, гексагональная	$Z \parallel [0001]$, $Y \parallel [10\bar{1}0]$, иногда $X \parallel [10\bar{1}0]$, а $Y \parallel [11\bar{2}0]$	Ось Z параллельна оси высшего порядка (3, или $\bar{3}$, или 6, или $\bar{6}$). Ось X параллельна оси 2 (если они имеются, кроме класса $6m2$). Для классов $3m$ и $6m2$ обычно X перпендикулярна m, но иногда m нормальна к оси Y
Тетрагональная	$Z \parallel [001]$, $Y \parallel [010]$, $X \parallel [100]$	Ось Z параллельна оси высшего порядка (4 или $\bar{4}$). X и Y параллельны осям 2 или нормальны к плоскостям m (если они есть). Для класса $\bar{4}2m$ обычно оси X и Y параллельны осям 2
Кубическая	$Z \parallel [001]$, $Y \parallel [010]$, $X \parallel [100]$	Оси X, Y, Z параллельны трем осям 4 (или $\bar{4}$), а если их нет — трем взаимно нормальным осям 2

2.2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ [3, 5]

Кристаллофизическая система координат

Так как кристаллографическая система координат в общем случае не ортогональна, для описания физических свойств используют ортогональную кристаллофизическую систему координат (табл. 2.7).

Как и кристаллографическую систему координат, кристаллофизическую систему выбирают правой так, чтобы в положительный квадрант кристаллофизической системы координат входил квадрант кристаллографической системы с углами, меньшими 90°.

В ряде случаев выбор кристаллофизических осей неоднозначен. В сочетании с неоднозначностью выбора кристаллографических осей для тех же классов произвол оказывается еще большим. Это необходимо учитывать при использовании констант кристаллов, описывающих анизотропные физические свойства. Чаще всего в таких случаях установку осей связывают с данными по дифракции рентгеновского излучения от различных кристаллографических плоскостей.

Симметрия физических свойств

Математически физические величины описываются тензорами различных рангов.

Физические тензоры в зависимости от их отношения к объекту бывают двух видов: так называемые *полевые* тензоры, описывающие воздействие на кристалл, и *материальные* тензоры, описывающие свойства кристалла, т. е. соотношение между воздействием и реакцией на это воздействие.

РАНГ ТЕНЗОРА. Тензор нулевого ранга — *скаляр* — величина, не зависящая от преобразования координат.

Есть величины, сохраняющие числовые значения при преобразовании координат, но при отражении в плоскости, инверсии, зеркальном и инверсионном повороте меняющие знак. Такие величины называют *псевдоскалярами* (или псевдотензорами нулевого ранга). Примером псевдоскаляра может служить вращение плоскости поляризации света.

Тензор первого ранга — *вектор*. Связь между векторами a и c можно выразить через компоненты этих векторов (a_1, a_2, a_3 и c_1, c_2, c_3) вдоль осей X, Y и Z:

$$\left.\begin{aligned} c_1 &= U_{11}a_1 + U_{12}a_2 + U_{13}a_3; \\ c_2 &= U_{21}a_1 + U_{22}a_2 + U_{23}a_3; \\ c_3 &= U_{31}a_1 + U_{32}a_2 + U_{33}a_3. \end{aligned}\right\} \qquad (2.1)$$

Величину, связывающую векторы a и c, записывают в виде таблицы

$$U_{ik} = \begin{vmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{vmatrix} \qquad (2.2)$$

и называют *тензором второго ранга.* Коэффициенты U_{ik} называют *компонентами тензора.* Сокращенно (2.1) записывается в виде

$$c_i = U_{ik}a_k, \qquad i,\ k = 1,\ 2,\ 3. \qquad (2.3)$$

Такая запись предполагает суммирование по повторяющимся индексам.

Связь между вектором и тензором второго ранга описывается тензором третьего ранга

$$c_i = W_{ijk}U_{jk}, \qquad (2.4)$$

Таблица 2.8. **Соотношении между различиыми физическими свойствами, описываемыми тензорами различных рангов**

Определяющее уравнение	Воздействие	Реакция	Материальный тензор, описывающий свойство кристалла
$\Delta S = \left(\frac{c}{T}\right) \Delta T$	Скаляр	Скаляр	Скаляр
	Температура T	Энтропия S	Теплоемкость C
$\Delta P_i = p_i \Delta T$	Скаляр	Вектор	Вектор
	Температура T	Поляризация P	Пироэлектричество p
$\Delta S = Q_i \Delta E_i$	Вектор	Скаляр	Вектор
	Напряженность электрического поля E	Энтропия S	Электрокалорический эффект Q
$D_i = \varepsilon_{ij} E_j$	Вектор	Вектор	Тензор второго ранга
	Напряжеиность электрического поля E	Электрическая индукция D	Диэлектрическая проницаемость ε_{ij}
$h_i = -k_{i,j} \frac{\partial T}{\partial X_j}$	Вектор	Вектор	Тензор второго ранга
	Градиент температуры ∇T	Плотность теплового потока h	Теплопроводность $k_{i,j}$
$B_i = \mu_{i,j} H_j$	Аксиальный вектор	Аксиальный вектор	Тензор второго ранга
	Напряженность магнитного поля H	Магнитная индукция B	Магнитная проницаемость $\mu_{i,j}$
$X_{i,j} = \alpha_{i,j} \Delta T$	Скаляр	Тензор второго ранга	Теизор второго ранга
	Температура T	Деформация $X_{i,j}$	Тепловое расширение $\alpha_{i,j}$
$\Delta S = \beta_{i,j} X_{i,j}$	Тензор второго ранга	Скаляр	Тензор второго ранга
	Деформация $X_{i,j}$	Энтропия S	Пьезокалорический эффект $\beta_{i,j}$
$X_{i,j} = d_{i,j,k} E_k$	Вектор	Тензор второго ранга	Тензор третьего ранга
	Напряженность электрического поля E_k	Деформация $X_{i,j}$	Пьезоэлектрический эффект $d_{i,j,k}$
$\Delta B_{i,j} = r_{i,jk} E_k$	Напряженность электрического поля E_k	Нелинейная диэлектрическая проницаемость на оптических частотах $\Delta B_{j,j}$	Электрооптический эффект $r_{i,j,k}$
$X_{i,j} = s_{i,j,k,l} \sigma_{k,l}$	Тензор второго ранга	Тензор второго ранга	Тензор четвертого ранга
	Механическое напряжение $\sigma_{k,l}$	Деформация $X_{i,j}$	Упругая податливость $s_{i,j,k,l}$
$\sigma_{i,j} = C_{i,j,k,l} X_{k,l}$	Деформация $X_{k,l}$	Механическое напряжение $\sigma_{i,j}$	Упругая жесткость $c_{i,j,k,l}$
$\Delta B_{i,j} = \pi_{i,j,k,l} \sigma_{k,l}$	Механическое напряжение $\sigma_{k,l}$	Нелинейная диэлектрическая непроницаемость иа оптических частотах ΔB_{ij}	Пьезооптический эффект $\pi_{i,j,k,l}$
$\Delta B_{i,j} = p_{i,j,k,l} X_{k,l}$	Деформация $X_{k,l}$	Нелинейная диэлектрическая непроницаемость на оптических частотах $\Delta B_{i,j}$	Упругооптический эффект $p_{i,j,k,l}$

а связь между двумя тензорами второго ранга — тензором четвертого ранга

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} X_{kl}. \qquad (2.5)$$

Соотношения типа (2.3) — (2.5) (которые можно было бы продолжить до тензоров сколь угодно высоких рангов) и выражают связь между воздействием на кристалл, реакцией на это воздействие и свойством кристалла. В табл. 2.8 приведены различные материальные и полевые физические свойства, описываемые тензорами различных рангов. В этой же таблице приведены соотношения, связывающие воздействие, реакцию и свойство кристалла.

В табл. 2.8 отражена небольшая часть различных свойств кристаллов. Можно еще упомянуть термоэлектричество, коэффициенты самодиффузии, пиромагнитный и пьезомагнитный эффекты, магнитострикцию, фотогальваинческий эффект, удельное электрическое сопротивление, электрогирацию и другие эффекты, описываемые тензорами до четвертого ранга включительно. В последнее время исследуются, а иногда и используются эффекты, описываемые тензорами пятого и шестого рангов: нелинейная упругость, акустическая активность, пьезооптический эффект второго порядка, электроупругий эффект и ряд других.

Матричное описание физических свойств кристаллов

Тензоры различных рангов удобно представлять и использовать в виде матриц. Например, (2.2) представляет матрицу тензора второго ранга. Соотношения между тензорами (например, уравнения (2.3) — (2.5)) также удобно использовать в виде матриц. Операции с матрицами можно найти в специальной литературе [5, 7]. Наиболее важна для настоящего описания операция умножения:

$$(AB)_{ik} = A_{ij} B_{jk}. \qquad (2.6)$$

Если матрица A представляет собой матрицу $(i \times j)$, где i — число строк, j — число столбцов, а B есть $(j \times k)$-матрица, то произведение AB является $(i \times k)$-матрицей. Элементы этой матрицы задаются соотношением (2.6). Следует помнить, что, как правило,

$$AB \neq BA. \qquad (2.7)$$

Весьма часто тензоры второго ранга симметричны

$$A_{ij} = A_{ji}. \qquad (2.8)$$

Тензоры третьего ранга бывают симметричными по двум индексам

$$U_{ijk} = U_{jik}, \qquad (2.9)$$

а тензоры четвертого ранга — по двум парам индексов

$$U_{ijkl} = U_{jikl} = U_{ijlk}. \qquad (2.10)$$

Это позволяет использовать более краткие матричные обозначения с уменьшенным числом индексов. При этом имеется следующая связь между индексами:

$$\begin{array}{ccccccccccc} 11 & & 22 & & 33 & 23=32 & & 31=13 & & 12=21 \\ \updownarrow & & \updownarrow & & \updownarrow & \updownarrow & & \updownarrow & & \updownarrow \\ 1 & & 2 & & 3 & 4 & & 5 & & 6 \end{array} \qquad (2.11)$$

(верхние индексы — тензорные, нижние — индексы сокращенной матрицы).

Таким образом, для тензора второго ранга

$$\begin{vmatrix} 11 & 12 & 13 \\ 21 & 22 & 23 \\ 31 & 32 & 33 \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} 1 & 6 & 5 \\ 6 & 2 & 4 \\ 5 & 4 & 3 \end{vmatrix} \rightarrow \| 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6 \|.$$

Таблица 2.9. Матрицы материальных тензоров второго ранга для разных сингоний

Сингония	Матрица	Примечание
Триклинная	$\|A_1\ A_2\ A_3\ A_4\ A_5\ A_6\|$	—
Моноклинная	$\|A_1\ A_2\ A_3\ 0\ A_5\ 0\|$	Ось Y параллельна оси 2
Ромбическая	$\|A_1\ A_2\ A_3\ 0\ 0\ 0\|$	—
Тетрагональная, Тригональная, Гексагональная	$\|A_1\ A_1\ A_3\ 0\ 0\ 0\|$	—
Кубическая	$\|A\ A\ A\ 0\ 0\ 0\|$	—

Таблица 2.10. Матрицы материальных тензоров третьего ранга для различных кристаллографических классов

Триклинная система

Класс 1

$$\begin{vmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{15} & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{25} & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{35} & T_{36} \end{vmatrix}$$

Класс $\bar{1}$

Все компоненты равны 0

Моноклинная сингония

Класс 2 (Ось Y параллельна оси второго порядка)

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & T_{16} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & 0 & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{34} & 0 & T_{36} \end{vmatrix}$$

Класс m (ось Y перпендикулярна плоскости симметрии)

$$\begin{vmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & 0 & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{24} & 0 & T_{26} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & 0 & T_{35} & 0 \end{vmatrix}$$

Класс $2/m$ — все компоненты равны 0.

Ромбическая сингония

Класс 222

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{36} \end{vmatrix}$$

Класс $2m$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{24} & 0 & 0 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс mmm — все компоненты равны 0

Тетрагональная сингония

Класс 4

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{15} & T_{14} & 0 \\ T_{31} & T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс $\bar{4}$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -T_{15} & T_{14} & 0 \\ T_{31} & -T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & T_{16} \end{vmatrix}$$

Класс 422

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс $4\ m\ m$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 & 0 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс $\bar{4}2m$ (ось X параллельна оси второго порядка)

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{36} \end{vmatrix}$$

Для классов $4/m$ и $4/mmm$ — все компоненты равны 0

Продолжение табл. 2.10

Тригональная сингония

Класс 3

$$\begin{vmatrix} T_{11} & -T_{11} & 0 & T_{14} & T_{15} & 2T_{22} \\ T_{22} & -T_{22} & 0 & T_{15} & -T_{14} & 2T_{11} \\ T_{31} & T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс 3 m (ось X перпендикулярна плоскости симметрии)

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & T_{15} & 2T_{21} \\ T_{21} & -T_{21} & 0 & T_{15} & 0 & 0 \\ T_{31} & T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс 32

$$\begin{vmatrix} T_{11} & -T_{11} & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{14} & 2T_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Для классов $\bar{3}$, $\bar{3}m$ — все компоненты равны 0

Гексагональная сингония

Класс 6

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{15} & -T_{14} & 0 \\ T_{31} & T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс 622

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс $6m2$ (ось X перпендикулярна плоскостн симметрии)

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2T_{22} \\ -T_{22} & T_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс $6m$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 & 0 \\ T_{31} & T_{31} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Класс $\bar{6}$

$$\begin{vmatrix} T_{11} & -T_{11} & 0 & 0 & 0 & 2T_{22} \\ -T_{22} & T_{22} & 0 & 0 & 0 & 2T_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Для классов $6/m$ и $6/mmm$ все компоненты равны 0

Кубическая сингония

Классы 23 и $\bar{4}3m$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{14} \end{vmatrix}$$

Для классов $\bar{4}32$, $m3m$, $m3$ — все модули равны 0

Предельные группы (текстуры)

Симметрия ∞

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{15} & T_{14} & 0 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Симметрия $\infty 22$

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & T_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -T_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Симметрия ∞mm

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{15} & 0 & 0 \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Для групп симметрии ∞/m. $\infty/m\,m\,m$, ∞/∞, $\infty/\infty\,m\,m$, все компоненты равны 0

Таблица 2.11. **Матрицы материальных тензоров четвертого ранга с попарно симметричными индексами (фотоупругость, электрострикция и т. п.) для различных кристаллографических классов**

Триклинная сингония

Классы $1, \bar{1}$

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} & p_{56} \\ p_{61} & p_{62} & p_{63} & p_{64} & p_{65} & p_{66} \end{vmatrix}$$

Моноклинная сингония

Классы 2, m, $2/m$. Ось 2 или нормаль к m параллельны оси Y

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & p_{14} & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & 0 & p_{24} & 0 \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & 0 & p_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & p_{46} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & 0 & p_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{64} & 0 & p_{66} \end{vmatrix}$$

Продолжение табл. 2.11

Ромбическая сингония

Классы 222, $2m$, mmm

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & 0 & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{66} \end{vmatrix}$$

Тригональная сингония

Классы 3, $\bar{3}$

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & -p_{14} & -p_{15} & -p_{16} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ p_{41} & -p_{41} & 0 & p_{44} & p_{45} & p_{51} \\ p_{51} & -p_{51} & 0 & -p_{45} & p_{44} & p_{41} \\ -p_{16} & p_{16} & 0 & -p_{15} & p_{14} & * \end{vmatrix}$$

Классы $3m$, 32, $\bar{3}\,m$

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & -p_{14} & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{31} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ p_{41} & -p_{41} & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{41} & p_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{14} & * \end{vmatrix}$$

Тетрагональная сингония

Классы 4, $\bar{4}$, $4/m$

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & p_{16} \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & 0 & 0 & -p_{16} \\ p_{31} & p_{31} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ p_{61} & -p_{61} & 0 & 0 & 0 & p_{66} \end{vmatrix}$$

Классы $4\,m\,m$, $\bar{4}2m$, 422, $4/mmm$

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{31} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{66} \end{vmatrix}$$

Гексагональная сингония

Классы 6, $\bar{6}$, $6/m$

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & p_{16} \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & 0 & 0 & -p_{16} \\ p_{31} & p_{31} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{54} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p_{54} & p_{44} & 0 \\ -p_{16} & p_{16} & 0 & 0 & 0 & * \end{vmatrix}$$

Классы $\bar{6}m2$, $6mm$, 622, $6/mmm$

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{31} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * \end{vmatrix}$$

Кубическая сингония

Классы 23, $m3$

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{13} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{13} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{vmatrix}$$

Классы $\bar{4}3m$, 432, $m3m$

$$\begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{vmatrix}$$

Примечание. Знаком * обозначено $\frac{1}{2}(p_{11}-p_{12})$.

Для тензора третьего ранга U_{ijk}, симметричного по индексам ij, получается матрица (3×6) вместо матрицы (3×9):

$$\begin{vmatrix} 111 & 112 & 113 & 121 & 122 & 123 & 131 & 132 & 133 \\ 211 & 212 & 213 & 221 & 222 & 223 & 231 & 232 & 233 \\ 311 & 312 & 313 & 321 & 322 & 323 & 331 & 332 & 333 \end{vmatrix} \rightarrow$$

$$\rightarrow \begin{vmatrix} 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 \\ 21 & 22 & 23 & 24 & 25 & 26 \\ 31 & 32 & 33 & 34 & 35 & 36 \end{vmatrix}.$$

Для тензора четвертого ранга, симметричного попарно по индексам ij и kl, вместо матрицы (19×9) получается матрица (6×6).

При переходе к более компактной матрице следует помнить, что для компонент, содержащих индексы 4, 5, 6 в сокращенном обозначении, надо вводить численные множители (2, 4 и т. п.) относительно соответствующих правилу (2.11) компонент тензорной матрицы.

На матрицы материальных тензоров накладываются дополнительные ограничения, связанные с симметрией кристаллов (табл. 2.9—2.11).

Классы симметрии, для которых все компоненты тензора третьего ранга равны нулю, обладают общим элементом симметрии — центром симметрии. Это не случайно, а является следствием *принципа Неймана*. Суть этого принципа в том, что группа симметрии любого физического свойства какого-либо кристалла включает элементы симметрии класса, к которому принадлежит данный кристалл. Это условие необходимое, но недостаточное. Например, для существования пьезоэлектричества отсутствие центра симметрии обязательно. Но в кристалле без центра симметрии пьезоэффекта может и не быть.

В приведенных в табл. 2.9—2.11 матрицах для многих кристаллографических классов несколько компонент должны быть равны друг другу. Обычно их обозначают одинаково по компоненте с наименьшими индексами. При использовании таблиц следует помнить о всех не равных нулю компонентах, так как в таблицах приводятся только независимые компоненты.

Например, для класса 32 (случай кристалла кварца) есть только две независимые компоненты матрицы, описывающей пьезоэффект. Однако, как следует из матрицы (см. табл. 2.10), компонента d_{11} может описывать, во-первых, деформацию растяжения — сжатия по оси X при приложении электрического поля по той же оси, во-вторых, деформацию растяжения — сжатия по оси Y при приложении электрического поля по оси X и, в-третьих, деформацию сдвига XY при приложении поля по оси Y.

Некоторые материальные тензоры четвертого ранга (например, тензор упругой жесткости c_{ijkl}) симметричны не только относительно перестановки первого со вторым и третьего с четвертым индексов, но и относительно перестановки первой пары индексов со второй:

$$c_{ijkl} = c_{jikl} = c_{ijlk} = c_{klij}. \qquad (2.12)$$

При этом вид матриц (6×6), приведенных в табл. 2.11, сохраняется, но число независимых компонент уменьшается за счет уменьшения в 2 раза числа независимых недиагональных компонент (так как $c_{ij} = c_{ji}$). Например, для класса 3 независимые компоненты тензора фотоупругости — p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{16}, p_{31}, p_{33}, p_{41}, p_{44}, p_{45}, а независимые компоненты тензора упругой жесткости для того же класса — c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{15}, c_{16}, c_{44}, c_{45}.

Влияние внешнего воздействия

В кристаллофизике помимо принципа Неймана есть еще один симметрийный постулат, позволяющий определить симметрию кристалла при внешнем воздействии. Этот постулат называют *принципом Кюри*. Согласно этому принципу кристалл при внешнем воздействии изменяет свою точечную симметрию, но сохраняет элементы симметрии, общие с симметрией воздействия.

Для определения реакции на воздействие можно использовать перемножение матриц согласно (2.6). Например, так записывают упругопьезодиэлектрическую матрицу:

$$\begin{vmatrix} & | X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 | \\ \begin{vmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} & | D_1 & D_2 & D_3 | \\ \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} \\ g_{51} & g_{52} & g_{53} \\ g_{61} & g_{62} & g_{63} \end{vmatrix} \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{vmatrix} \end{vmatrix} \qquad (2.13)$$

Первый столбец матриц в данной записи описывает воздействие, а первая строка — реакцию. В частности, деформация в кристалле ниобата лития (класс 3), вызванная электрическим полем с компонентами по осям X и Z, записывается так:

$$\begin{vmatrix} & | X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 | \\ \begin{vmatrix} E_1 \\ 0 \\ E_3 \end{vmatrix} & \begin{vmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 2d_{11} \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \end{vmatrix} \qquad (2.14)$$

В соответствии с (2.6) из (2.14) получаем: $X_1 = E_1 d_{11} + E_3 d_{31}$; $X_3 = E_3 d_{33}$; $X_2 = -E_1 d_{11} + E_3 d_{31}$; $X_5 = E_1 d_{15}$; $X_4 = X_6 = 0$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вайнштейн Б. К.** Современная кристаллография. Т. 1. М.: Наука, 1979.

2. **Шубников А. В., Флинт Е. Е., Бокий Г. Б.** Основы кристаллографии. М.: Изд-во АН СССР, 1940.

3. **Шувалов Л. А.**//Современная кристаллография. Т. 4. М.: Наука, 1981.

4. **Залесский А. В.**//Современная кристаллография. Т. 4. М.: Наука, 1981.

5. **Най Дж.** Физические свойства кристаллов. М.: Мир, 1967.

6. **Вустер У.** Применение тензоров и теории групп для описания физических свойств кристаллов. М.: Мир, 1977.

7. **Кочин Н. Е.** Векторное исчисление и начало тензорного исчисления. М.: Наука, 1965.

8. **Желудев И. С.** Симметрия и ее приложения. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983.

ГЛАВА 3
МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Н. В. Кадобнова, А. М. Братковский

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В зависимости от вида нагружения (растяжение, сжатие, изгиб, кручение, срез) и условий воздействия (температура, скорость, периодичность и время приложения) материалы принято характеризовать различными мерами сопротивления их деформации и разрушению — характеристиками механических свойств.

Механические свойства условно могут быть разделены на три основные группы.

Первая группа содержит комплекс характеристик, определяемых при однократном кратковременном нагружении. К ним отиосятся упругие свойства: модуль нормальной упругости E, модуль сдвига G и коэффициент Пуассона μ. Сопротивление малым упругопластическим деформациям определяется пределами упругости $\sigma_{упр}$, пропорциональности $\sigma_{пц}$ и текучести $\sigma_{0,2}$. Предел **прочности $\sigma_в$, сопротивление срезу $\tau_{ср}$ и сдвигу $\tau_{сдв}$,** твердость вдавливанием (по Бринеллю) НВ и царапанием (по шкале Мооса), а также разрывная длина $L_р$ являются характеристиками материалов в области больших деформаций вплоть до разрушения. Пластичность характеризуется относительным удлинением δ и относительным сужением ψ после разрыва, способность к деформации ряда неметаллических материалов — удлинением при разрыве $\delta_р$. Кроме того, при ударном изгибе определяется ударная вязкость образца с надрезом KCU.

Вторая группа включает параметры, оценивающие сопротивление материалов переменным и длительным статическим нагрузкам. При повторном нагружении в области многоцикловой усталости определяется предел выносливости на базе $10^7 \div 2 \cdot 10^7$ циклов. Малоцикловая усталость отделяется от многоцикловой условно выбранной базой испытания ($N \geqslant 5 \cdot 10^4$ циклов) и отличается пониженной частотой нагружения ($f = 0{,}1 \div 5$ Гц). Сопротивление малоцикловой усталости оценивается по долговечности при заданном уровне повторных напряжений или пределом малоцикловой усталости на выбранной базе испытаний. Сопротивление длительным статическим нагрузкам определяют, как правило, при температуре выше 20°С. Критериями сопротивления материалов длительному действию постоянных напряжений и температуры являются пределы ползучести $\sigma_{0,2/\tau}$ и длительной прочности σ_τ. Предел длительной прочности определяют при заданной базе испытаний, обычно 100 и 1000 ч, предел ползучести — по заданному допуску на остаточную (обычно 0,2%) или общую деформацию при установленной базе испытаний.

Третью группу составляют характеристики разрушения. В инженерной практике эти характеристики используются сравнительно недавно. Характеристики разрушения определяются на образцах с заранее выращенными начальными трещинами и оцениваются следующими основными параметрами: вязкость разрушения, критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации K_{1C}, вязкость разрушения, условный критический коэффициент интенсивности напряжений при плосконапряженном состоянии K_C, удельная работа образца с трещиной КСТ и скорость роста трещины усталости СРТУ при заданном размахе интенсивности напряжений ΔK.

Среди механических свойств только упругие свойства металлических материалов являются структурно нечувствительными характеристиками, связанными с параметрами кристаллической решетки и практически не зависящими от режимов термомеханической обработки, если последние не вызывают аллотропических превращений. Для практически изотропных поликристаллических металлических материалов упругие константы связаны соотношением $E = 2G(1+\mu)$. Упругие свойства определяют при статических испытаниях ($E_{ст}$, $G_{ст}$) или динамическим методом ($E_{дин}$, $G_{дин}$) по резонансной частоте колебаний тонкого стержня равномерного сечения под действием малых напряжений. Значения упругих констант, определенных обоими методами, при температуре 20°С и близких к ней практически одинаковы. С повышением температуры при статических испытаниях сказывается влияние деформации ползучести, вследствие чего статический метод дает прогрессирующее понижение значений упругих констант относительно данных, полученных динамическим методом.

Все другие механические свойства в большей или меньшей степени структурно чувствительны и анизотропны. Резкая анизотропия упругих и других механических характеристик присуща многим неметаллическим материалам, что определяется их ориентированным строением. Некоторая анизотропия свойственна и большинству металлических материалов. Уровень прочности, пластичности, выносливости и характеристик разрушения обычно в продольном направлении относительно оси деформации полуфабриката выше, чем в поперечном. Однако для некоторых, например титановых, сплавов характерна «обратная» анизотропия. Наблюдается значительная разница в пределах текучести при растяжении и сжатии у большинства магниевых деформируемых сплавов ($\sigma_{0,2сж} \ll \sigma_{0,2}$).

Между некоторыми характеристиками механических свойств экспериментально установлены зависимости, позволяющие с достаточной степенью точности оценивать предел прочности материала по значениям твердости, а сопротивление срезу — по пределу прочности. Существуют также корреляционные связи между пределом выносливости и пределом прочности, а также между различными характеристиками разрушения.

3.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 20°С

Механические свойства металлов и сплавов при растяжении определяются по ГОСТ 1497—84, при сжатии — по ГОСТ 25. 503—80, при кручении — по ГОСТ 3565—80, при срезе — по ОСТ1. 90148—74. ГОСТ 9012—59 регламентирует методику определения твердости по Бринеллю, ГОСТ 9013—59 — твердости по Роквеллу, ГОСТ 9450—76 — микротвердости, ГОСТ 9454—78 — ударной вязкости.

Определение механических свойств пластмасс при растяжении проводится по ГОСТ 11262—80 и ГОСТ 25.603—82, при сжатии — по ГОСТ 4651—82. Упругие свойства оцениваются по ГОСТ 9550—81, твердость — по ГОСТ 4647—80. Прочность при разрыве и модуль эластичности резин определяются согласно ГОСТ 270—75 и ГОСТ 210—75 соответственно.

В табл. 3.1—3.32 представлены следующие характеристики:

E — модуль упругости — коэффициент пропорциональности между нормальным напряжением и относительным удлинением;

G — модуль сдвига (модуль касательной упруго-

сти) — коэффициент пропорциональности между касательным напряжением и относительным сдвигом;

μ — коэффициент Пуассона — абсолютное значение отношения поперечной деформации к продольной в упругой области;

$\sigma_{пц}$ — предел пропорциональности — напряжение, при нагружении до которого деформации возрастают пропорционально напряжениям; в технике принят условный $\sigma_{нц}$ — напряжение, при котором отклонение приращения деформации от линейного закона достигает определенного значения, обычно 50%;

$\sigma_{0,2}$ — предел текучести (условный) — напряжение, при котором остаточная деформация после снятия нагрузки составляет 0,2 %;

$\sigma_в$ — временное сопротивление (предел прочности), прочность на разрыв (для неметаллических материалов) — напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом при испытании;

δ — относительное удлинение — отношение абсолютного остаточного удлинения образца после разрыва к начальной расчетной длине;

ψ — относительное сужение — отношение уменьшения площади поперечного сечения образца после разрыва к начальной площади;

$\delta_р$ — относительное удлинение при разрыве (для неметаллических материалов) — полное изменение расчетной длины образца в момент разрыва, отнесенное к начальной расчетной длине;

$L_р$ — разрывная длина — характеристика прочности нитей, волокон, тканей и других материалов, для которых невозможно точно определить площадь поперечного сечения; вычисляется по формулам $L_р = P_р \frac{l}{Q}$; $L_р = \frac{P_р}{gb}$, где $P_р$ — нагрузка при разрыве; Q, l и b — масса, длина и ширина образца между зажимами; g — масса 1 м^2 материала;

KCU — ударная вязкость — работа разрушения образца с кольцевым надрезом при ударном изгибе, отнесенная к площади образца в сечении надреза, для неметаллов определяется также на образцах без надреза;

НВ — твердость по Бринеллю, определяемая вдавливанием стального шарика в испытуемый материал как среднее напряжение, приходящееся на единицу поверхности сферического отпечатка;

$H_μ$ — микротвердость — сопротивление вдавливанию алмазного наконечника при очень малых нагрузках с получением малых глубин и размеров отпечатка.

Твердость по шкале Мооса — сопротивление механическому воздействию минералов и других материалов, определяемое царапанием. Мерой твердости служит номер наиболее твердого минерала, не оставляющего следа при царапании. Эталонами твердости являются тальк [1], гипс [2], кальций [3], флюорит [4], апатит [5], ортоклаз [6], кварц [7], топаз [8], корунд [9], алмаз [10].

Металлы

Таблица 3.1. **Упругие свойства металлов**

Металл	E, ГПа	G, ГПА	μ	Литература	Металл	E, ГПа	G, ГПа	μ	Литература
Алюминий	69—72	25—26,5	0,31	[1, 5]	Никель	200—220	73—77	0,3—0,4	[1, 2, 4]
Берилий	300	145	0,03	[1, 3]	Ниобий	91—160	—	0,39	[1, 6]
Бор	345	—	—	[1]	Олово	41—55	16—19	0,33	[1, 2, 4]
Ванадий	139—170	47—60	0,36	[1, 3, 6]	Осмий	575	225	0,28	[3, 8]
Висмут	32	12	0,33	[1, 4]	Палладий	115—125	49—52	0,39	[1—4, 8]
Вольфрам	350—400	125—155	0,3	[1, 4, 6]	Платина	150—175	61—68,5	0,36	[1—3, 8]
Гадолиний	56—98	23	0,26	[2, 3]	Празеодим	35—98	14	0,3	[2, 3]
Гафний	79—150	—	0,29	[1, 2, 6]	Рений	475	—	—	[2]
Германий	82	—	—	[1]	Родий	385	150	0,26	[3, 8]
Гольмий	67	—	—	[2]	Рубидий	2,5	—	—	[1]
Диспрозий	64—98	26	0,24	[2, 3]	Рутений	420—500	175	0,31	[3, 8]
Железо	195—205	77—80	0,28	[1, 3, 4, 7]	Самарий	34—55	13	0,35	[2, 3]
Золото	78—83	28,5	0,4	[3, 8]	Свинец	14—18	5,5—8	0,45	[1, 2, 4, 14]
Индий	10,5	—	0,46	[1, 2]	Селен	55	19	0,45	[1, 4]
Иридий	520—590	220	0,28	[2, 6, 8]	Серебро	72—83,5	27—29,5	0,37	[1, 3, 4, 8]
Иттербий	18	—	—	[2]	Сурьма	57—78	—	—	[1, 2]
Иттрий	66	26	0,27	[2, 3]	Таллий	8	—	—	[1, 2]
Кадмий	50—53	20	0,3	[1. 4, 7]	Тантал	190	70	0,35	[1, 3, 6]
Кальций	26	—	—	[1, 2]	Теллур	44	—	—	[4]
Кобальт	206	78,5	0,32	[1, 2]	Тербий	57,5	—	—	[2]
Кремний	110—160	—	—	[1, 2]	Титан	110	41,5	0,33	[3, 10]
Лантан	38	15	0,26	[2, 3]	Торий	74—80	—	—	[1, 2]
Литий	5	—	0,42	[2, 4]	Уран	210	—	—	[1]
Магний	42,5—45	16—18	0,35	[1, 3, 4, 7]	Хром	280—315	110	0,31	[1—3]
Марганец	200	—	—	[1]	Цезий	1,75	—	—	[1]
Медь	110—130	41,5—44	0,38	[1—3, 7]	Церий	44	—	0,25	[3]
Молибден	300—330	120	0,31	[3, 6]	Цинк	100—130	37	0,3—0,35	[1, 2, 7]
Неодим	38	15	0,28	[2, 3]	Цирконий	84—97	33	0,35	[1, 2, 6]
					Эрбий	73—115	30	0,24	[2, 3]

Таблица 3.2. **Прочность и пластичность металлов**

Металл	Состояние, степень чистоты	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	НВ, МПа	Литература
Алюминий	Отожженное, 99,95% Al	22	50	45	90	150	[1, 3—5]
	» , 99,5 % Al	30	80	35	80	250	[1, 3—5]
Барий	»	—	12	—	40	—	[4, 11]
Бериллий	Литое	—	140	0	—	—	[1, 3, 4]
	Отожженное	230	320	2,5	—	—	[1, 3, 4]
	Горячепрессованное	300	450	3,5	—	1500	[1, 3 4]
Бор	Отожженное	—	250 ($\sigma_{в.сж}$)	—	—	—	[1]
Ванадий	» , 99,98 % V	105	220	30	75	800	[3, 4, 6]
	» , 99,6 % V	540	590	10	25	—	[3, 4, 6]
Висмут	»	—	5—20	0	0	90	[1, 4]
Вольфрам	Деформированное, 99,95 % W	760	1000	0	0	4150	[1, 3]
	Рекристаллизованное, 99,95% W	—	500	0	0	3200	[1, 3]
Гадолиний	Кованое	270	395	7	—	700	[3]
Галлий	Отожженное	—	40	40	—	60	[1]
Гафний	»	500	700	6	25	1600	[1, 6]
Германий	»	—	68 ($\sigma_{в.сж}$)	—	—	—	[4, 11]
Гольмий	Литое	220	260	5	—	500	[3]
Диспрозий	»	230	250	6	—	550	[3]
	Кованое	330	435	3	—	1030	[3]
Железо	Отожженное, особой чистоты	170	290	50	90	800	[3]
Золото	Отожженное	40	150	40	90	220	[1, 8]
Иридий	»	90—100	400—500	6—10	10—15	1700—2200	[8]
Иттербий	»	67	75	6	—	—	[2]
Иттрий	»	280	300	4	8	900—1650	[2, 3]
Кадмий	»	10	75	20	50	200	[1, 4]
Кальций	»	13,5	60	10	58	300	[1, 4]
Кобальт	Литое, 99,4 % Co	—	240	—	—	1250	[1, 3, 4]
	Закаленное, 99,4 % Co	210	280	4	8	1500	[1, 3, 4]
	Отожженное, 99.4 % Co	300	470	3,5	4,5	1550	[1, 3, 4]
Кремний	»	—	700	0	0	—	[1, 4]
Лантан	Литое	125	130	8	—	400	[3]
	Кованое	190	220	4	—	—	[3]
Литий	Отожженное	—	115	50	—	—	[1, 4]
Магний	Литое	24	115	8	9	300	[1, 3, 4]
	Отожженное	40	185	15	20	—	[1, 3, 4]
	Деформированное	90	195	10	12	400	[1, 3, 4]
Медь	Отожженное	70	215	60	75	400	[3]
	Нагартованное	380	440	6	35	1000	[3]
Молибден	Отожженное	570	670	25	50	1800	[1, 3]
Неодим	Литое	165	170	11	—	—	[3]
	Кованое	—	215	2	—	400	[3]
Никель	Отожженное	80	400	40	70	860	[1, 3]
Ниобий	» , высокой чистоты	210	275	28	80	500	[1, 3, 4]
	» , технической чистоты	280	330	20	80	700	[1, 3, 4]
	Литое	500	600	10	20	—	[1, 3, 4]
Олово	Отожженное	—	30	40	75	60	[4]
Осмий	Отожженное	—	—	—	—	3000—4000	[1, 6]
Палладий	»	60	195	40	85	480	[3, 8]
Платина	»	70	145	45	95	470	[3, 8]
Празеодим	Литое	100	110	10	—	—	[3]
	Кованое	200	215	7	—	400	[3]
Рений	Отожженное	—	500	20	—	2000	[1]
Родий	»	70—100	400—570	8—15	20—25	1000—1300	[3, 8]
Рутений	»	360—400	500—600	3—10	—	2000—3000	[3, 8]
Самарий	Литое	115	125	3	—	—	[3]
	Кованое	180	190	8	—	550	[3]
Свинец	Отожженное	5	14—18	50	100	—	[1, 14]
Селен	»	—	—	—	—	710	[4]
Серебро	»	20—30	140—180	45	90	500	[1, 3, 8]
Скандий	»	—	400	10	—	550	[2, 3]
Стронций	»	—	50	2	10	—	[4, 8]
Сурьма	»	—	8	0	0	—	[1, 4]

Продолжение табл. 3.2

Металл	Состояние, степень чистоты	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	НВ, МПа	Литература
Таллий	Отожженное	—	9	35	100	—	[1]
Тантал	»	400	500	30	75	1250—1400	[1, 3, 6]
	Нагартованное	—	950	4	6	2250	[1, 3, 6]
Теллур	Отожженное	—	10	35	100	270	[1, 4]
Титан	» , особой чистоты	100	250	70	85	600	[2, 3, 6, 10]
	» , 99,6 %	300	350	30	60	—	[2, 3, 6, 10]
Торий	»	180	220	60	70	—	[1]
Уран	»	200	300	12	15	—	[1]
Хром	»	190	300	2	5	1000	[3, 6]
Церий	Литое	90	105	24	—	250	[1, 3]
	Кованое	110	150	17	—	300	[1, 3]
Цинк	Отожженное	100	125	12	—	—	[1]
Цирконий	»	80—115	230—280	25	40	570	[1, 4, 11]
Эрбий	Литое	295	300	4	—	600	[3]
	Кованое	290	320	7	—	950	[3]

Стали

Используемые в машиностроении стали делятся на конструкционные (углеродистые и легированные) и высоколегированные нержавеющие.

Марка конструкционной углеродистой стали содержит двузначное число, обозначающее среднее содержание углерода в сотых долях процента (ГОСТ 380—71, ГОСТ 1050—74).

Согласно ГОСТ 4543—71 в обозначении марок конструкционной легированной стали первые две цифры указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента, буквы за цифрами означают: Р — бор, Ю — алюминий, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром, Г — марганец, Н — никель, М — молибден, В — вольфрам. Цифры после буквы указывают примерное процентное содержание легирующего элемента в целых единицах; отсутствие цифр означает, что в стали содержится до 1,5% этого легирующего элемента. В конце наименования марки высококачественной стали ставится буква А. У особо высококачественной стали в конце обозначения марки стоит через тире буква Ш.

В марках нержавеющих высоколегированных сталей по ГОСТ 5632—72 химические элементы обозначаются следующими буквами: А — азот, В — вольфрам, Д — медь, М — молибден, Р — бор, Т — титан, Ю — алюминий, Х — хром, Б — ниобий, Г — марганец, Е — селен, Н — никель, С — кремний, Ф — ванадий, К — кобальт, Ц — цирконий. Цифры, стоящие в наименовании марки после букв, указывают, так же как и в наименовании марок конструкционных сталей, процентное содержание легирующего элемента в целых единицах. Содержание элемента, присутствующего в стали в малых количествах, цифрами не обозначается. Цифра перед буквенным обозначением указывает на среднее или при отсутствии нижнего предела на максимальное содержание углерода в стали в сотых долях процента. Наименование марки литейной стали заканчивается буквой Л.

Механические свойства конструкционных сталей зависят от содержания углерода, для углеродистых сталей содержание углерода является определяющим (рис. 3.1, табл. 3.3).

Между некоторыми характеристиками механических свойств сталей установлены эмпирические зависимости. Твердость по Бринеллю приблизительно пропорциональна временно́му сопротивлению: для мало- и средиепрочных углеродистых и термически обработанных сталей $\sigma_в = 0{,}3 \div 0{,}4$ НВ. Сопротивление срезу $\tau_{ср}$ для мало- и среднепрочных сталей составляет 65—80% их предела прочности, для высокопрочных — 55—65%. Предел текучести при сжатии примерно равен пределу текучести $\sigma_{0,2}$, определенному при растяжении.

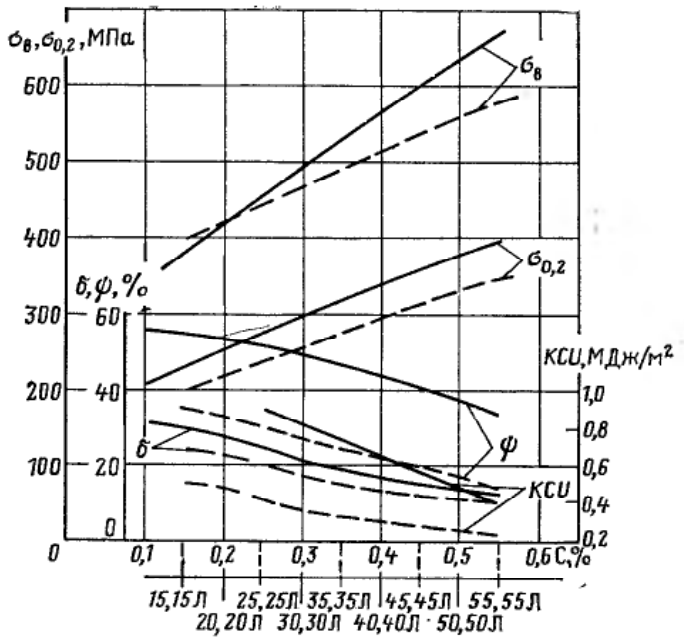


Рис. 3.1. Механические свойства конструкционных углеродистых деформируемых и литейных сталей в зависимости от содержания углерода [3, 24]: сплошные линии — деформируемые стали, пунктирные — литейные; по оси абсцисс — марки сталей в соответствии со средним содержанием углерода

Таблица 3.3. **Механические свойства углеродистых и малолегированных сталей малой и средней прочности после нормализации [3,24]** $E = 200 \div 210$ ГПа; $G = 77 \div 81$ ГПа; $\mu = 0{,}28 \div 0{,}31$

Стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	НВ, МПа	KCU, МДж/м²
Стали углеродистые обыкновенного качества						
Ст0	—	320	22	—	—	—
Ст1, Ст1кп	—	320—400	33	—	1100	—
Ст2, Ст2кп	190—220	340—420	31	—	1160	—
Ст3, Ст3кп	210—240	380—500	25—27	55—65	1310	—
Ст4, Ст4кп	240—260	420—520	23—23	—	1430	—
Ст5	260—280	500—640	19—21	45—55	1700	—
Ст6	300—310	600—710	14—16	40	1970	—
Стали углеродистые качественные и малолегированные						
08	200	330	33	60	—	—
10	210	340	31	55	1160	—
15	230	380	27	55	1300	—
20, 15г, 10г2	250	430	25	55	1430	—
25, 20г	280	460	24	50	—	0,9
30, 25г	300	500	22	50	1970	0,9
35, 30г	320	550	20	45	—	0,8
40, 35г	340	580	19	45	—	0,7
45, 40г, 30г2	360	610	16	45	2290	0,6
50, 45г, 35г2	380	640	14	40	2410	0,5
55, 50г, 40г2	390	670	12	40	2550	0,4
60, 45г2	410	700	12	40	2550	—
65, 60г	420	710	11	35	2550	—
70, 65г, 50г2	440	750	10	30	2690	—
70г	460	800	8	—	—	—
75*1	900	1100	7	30	—	—
80*1	950	1100	6	30	—	—
85*1	1000	1150	6	30	—	—

*1 После закалки и отпуска.

Таблица 3.4. **Механические свойства конструкционных деформируемых легированных сталей после закалки и отпуска [3, 9, 24]** $E = 200 \div 210$ ГПа; $G = 77 \div 81$ ГПа; $\mu = 0{,}28 \div 0{,}31$

Стали	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	НВ, МПа	KCU, МДж/м²
Стали малой прочности[1]						
09Г2, 09Г2Д, 12ГС, 14Г2, 19Г, 12ХГ	450—480	300—400	18	—	—	—
15ГС, 18Г2С, 10Г2СД, 14ХГС	500	350	18	—	—	—
10ХСНД, 15ХГН, 15ХСНД	520—540	360—400	16—18	—	—	—
25Г2С, 35ГС	600	400	14	—	—	—
Стали средней прочности						
20ХГСА	800	650	12	45	2070	0,7
39ХГН, 33ХС, 20ХН4ФА*2	900	700	12—13	45—50	2290	0,8—1,0
35Х, 30ХРА, 38ХА, 30ХМ, 38ХС, 20ХН3А	950	750—800	11—12	45—55	1970—2290	0,7—1,0
40Х, 40ХР, 45Х, 35ХМ, 20ХГР, 40ХГ, 40ХГР, 40ХН, 18ХНВА	1000—1050	800—850	9—12	45—50	2070—2400	0,6—0,9
50Х, 50ХН, 35ХМФА, 30ХГНА, 25ХГСА, 30ХГС, 30ХГСА, 40ХНМА*2, 40ХНВА*2, 25ХНВА*2, 30ХН3А	1100	850—950	9—12	40—50	2170—2290	0,5—0,8

Продолжение табл. 3.4

Стали	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	НВ, МПа	KCU, МДж/м²
Высокопрочные стали						
35ХГСА*3, 30ХГСНА*3, 30Х2Г2СВМА*3	1500—1650	1200—1300	10—13	45—55	4100—4500	0,7—0,9
30ХГНСМА	1750	1400	10	45	4600	0,6
40ХГСН3ВА*3	1900	1400	11	50	4900	0,6
40ХГСН3ВА	2000	1500	10	40	5150	0,55
Н18К9М5Т (закалка и старение)	2050	1950	7	50	—	0,5
Жаропрочные стали						
30ХМА, 20Х3МВФ, 33ХН3МА	900—950	750—850	12—19	50—60	2290	0,9—1,3
30ХА, 30ХГСА, 30Х3ВА, 40ХНВА	1050—1100	950	14—16	55—65	2290	0,6—1,4
30Х2Н2ВФА	1150	1100	15	60	2400	0,8
23Х2НВФА	1350	1150	13	55	—	0,6
30ХГСНА	1600	1350	9	45	—	0,6

*1 После нормализации.
*2 НЕ = 2690 МПа.
*3 Изотермическая закалка.

Таблица 3.5. **Прочность и пластичность конструкционных литейных сталей [3]** $E = 190 \div 200$ ГПа

Стали	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	НВ, МПа	KCU, МДж/м²
Легированные стали после закалки и отпуска						
27ГЛ, 30ГСЛ, 40ХЛ	650	400—500	10—14	20—30	1800—2290	0,35—0,5
35ХНЛ, 35ХМЛ, 30ХГСТЛ	700	500—550	12	25	2070—2600	0,4
35ХГСМЛ, 30ХНМЛ, 30ХНВЛ	800	600—650	10—12	20—30	2170—2690	0,4
35ХГСМЛ, 30ДХСНЛ, 27ХГСНЛ	900—1000	700—850	8—10	20—30	—	0,25—0,4
27ХГСНЛ, после изотермической закалки	1300—1500	1000—1200	5—6	20	—	0,25
Жаропрочные стали после нормализации и отпуска						
20МЛ, 25МЛ, 20ХМЛ, 20ХМФЛ	450—500	250—315	16—20	30—40	—	0,3—0,4
30ХМЛ, 23Х5МЛ	650—700	400—450	16—18	30—40	—	0,6
Х6Н2МВФ после закалки и отпуска	990	700	10	20	—	—

Таблица 3.6. **Механические свойства нержавеющих сталей [3, 9]**

Стали	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	НВ, МПа	KCU, МДж/м²
Аустенитные стали после закалки						
04Х18Н10, 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Б, 10Х17Н13М3Т	420—520	180—200	40	55	1350—2000	—
08Х18Н12Т, 12Х18Н9, 08Х17Н16М3Т, 20Х18Н9, 06Х23Н28М2Т	550—600	200—220	35—40	55	1350—2000	—
20Х13Н4Г9, 12Х17Г9АН4, 12Х14Г14Н	650—700	250—300	35—40	45—50	1600—2000	—
Х18Н9Л	450	200	25	35	—	

Стали	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	НВ, МПа	KCU, МДж/м²
Аустенитно-ферритные стали после закалки						
08Х20Н14С2, 20Х20Н14С2	550—600	250—300	35—40	—	—	1
08Х21Н5Т, 10Х21Н5Т,	650—700	300—450	20—30	—	—	0,6
08Х21Н6М2Т						
Ферритные и полуферритные стали после отпуска						
12Х17, 08Х17Т, 15Х28, 15Х25Т	450—500	250—300	18—20	40—55	1400—1900	—
10Х13Л, 20Х13Л	550—650	400—450	12—16	40—50	—	0,6—0,8
Мартенситные стали после закалки и отпуска						
10Х13, 20Х13	1200	1050	10—18	45—60	2550	0,5—0,7
30Х13, 40Х13	1650—1750	1400—1550	3—8	—	—	—
23Х13НВНФ	1500	1100	10	40	—	0,4
10Х17Н2, 10Х12Н2ВМФ,	1100—1300	900—1000	8—12	50—60	—	0,6—1,2
13Х14НВРА						
08Х17Н3СЛ	850—950	650—750	6—8	10—20	—	0,25
10Х13Н3ВФЛ	1200	100	7	20	—	0,19
Стали переходного класса после закалки, обработки холодом и старения						
08Х15Н9Ю, 08Х16Н6, 08Х17Н5М3	1200	900	10	—	—	0,5
10Х15Н4АМ3	1450—1600	1200	15—20	50—60	—	1—1,5
Мартенситно-стареющие стали после закалки и старения						
08Х15Н5Д2ТБ	1150—1300	1000—1300	18—20	60—70	—	1,4—2
03Х12Н10Д2ТБ	1600	1500	4	60	—	0,8
Жаропрочные стали после закалки и старения						
45Х14Н14В2М, после отжига	720	320	20	35	—	0,5
12ХН35ВМТР, 12ХН35ВТ	800—950	450—550	25	40	—	0,6
40Х15Н7Г7Ф2МС, 40Х12Н8Г8МФБ,	900	600	15	25	—	0,3
10Х12Н20Т3Р, 10Х12Н22Т3МР	1320	950—1000	20—25	40	—	0,75
10ХН35ВТЮ						

Алюминиевые сплавы

Для обозначения состояний деформируемых сплавов приняты следующие шифры: М — мягкий, отожженный; П — полунагартованный; Н — нагартованный; Т — закаленный и естественный состаренный; Т1 — закаленный и искусственно состаренный на высокую прочность; Т2 — закаленный и искусственно состаренный по режиму, обеспечивающему по сравнению с режимом Т1 более высокие значения вязкости разрушения и сопротивления коррозии под напряжением; Т3 — закаленный и искусственно состаренный по режиму, обеспечивающему наиболее высокое сопротивление коррозии под напряжением и высокие значения вязкости разрушения. Буква «ч» в обозначении марки сплава указывает на повышенную чистоту сплава (по примесям). Химический состав сплавов — по ГОСТ 4784—74.

Режимы термической обработки литейных сплавов дополнительно к марке сплава обозначаются следующим образом: Т1 — искусственное старение без предварительной закалки; Т2 — высокотемпературное старение. Отливки, не подвергаемые термической обработке, дополнительного шифра при марке сплава не имеют. Химический состав сплавов — по ГОСТ 2685—75.

Таблица 3.7. **Механические свойства алюминиевых деформируемых сплавов малой и средней прочности [3,5]**

$E = 70 \div 72{,}5$ ГПа; $G = 27 \div 28$ ГПа; $\mu = 0{,}31 \div 0{,}33$ (для тонких плакированных листов $E = 68{,}5 \div 70$ ГПа)

Система легирования	Сплав, состояние	Полуфабрикат	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$\tau_{ср}$, МПа	НВ, МПа
Al, технический	АД1М	Пруток, лист	80	35	35	55	250
	АД1Н	То же	150	100	6	70	320
Al—Mn	АМцМ	Лист	110	60	23	80	300
	АМцП	»	170	130	10	100	400
	АМцН	»	220	180	5	110	550
Al — Mg	АМг1М	Лист, пруток	120	50	28	100	300
	АМг2М	То же	190	100	23	125	450
	АМг2П	Лист	250	210	8	140	680
	АМг2Н	»	280	230	5	—	770
	АМг3М	Лист, пруток	230	120	25	155	580
	АМг3Н	Лист	270	230	8	—	750
	АМг4М	Лист, пруток	280	140	23	175	—
	АМг4П	Лист	320	240	12	—	—
	АМг5М	»	300	150	20	—	650
	АМг5М	Пруток, штамповка	300	160	14	180	—
	АМг6М	Лист, профиль	340	170	20	210	—
	АМг6М	Поковка	300	150	14	—	—
	АМг6Н	Лист	400	300	9	250	—
Al—Mg—Si	АД31Т	Профиль, пруток	170	80	20	—	—
	АД31Т1	То же	250	210	13	150	800
	АД33Т	»	240	140	20	160	650
	АД33Т1	»	320	280	12	190	950
	АД35Т	»	270	200	15	155	600
	АД35Т1	»	330	300	10	180	950
	АВТ1	»	350	290	12	210	950
	»	Штамповка	310	260	10	190	850
Al—Cu—Mg	Д1Т, Д1чТ	Штамповка	410	280	25	270	—
	Д16чТ, Д16Т	Лист, плита	450	320	18	290	—
	Д16чТ, Д16Т	Профиль, пруток	480	350	12	290	—
	Д16Т1, Д16чТ1	Лист, плита	470	400	8	—	—
	Д19Т, Д19чТ	Лист	440	310	16	—	—
	Д19Т, Д19чТ	Профиль, пруток	480	350	10	290	—
	ВАД1Т	Лист	440	280	18	—	—
	»	Профиль, пруток	500	360	13	—	—
	ВД17Т1	Штамповка	520	340	17	—	—
	АК4-1Т1	Лист, плита	420	360	7	—	—
	»	Профиль, пруток	420	370	7	—	—
	»	Поковка	420	320	8	—	—
Al—Zn—Mg	В92Т1	Лист, плита	400	300	10	—	—
	»	Профиль, пруток	470	350	8	—	—
	1915Т1	Лист, плита	360	280	11	—	—
	»	Профиль, пруток	380	320	10	—	—
	1911Т1	Лист, плита	420	350	12	—	—
	»	Профиль, пруток	520	420	15	—	—
Al—Cu—Mg—Si	АК6Т1	Поковка, штамповка	420	340	10	260	—
	АК8Т1	Штамповка	420	310	10	—	—
	»	Пруток	480	380	10	290	—

Таблица 3.8. **Механические свойства алюминиевых деформируемых высокопрочных сплавов [5]**

Система легирования	Сплав, состояние	Полуфабрикат	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	$\tau_{ср}$, МПа	НВ, МПа
Al—Zn—Cu—Mg	В95пчТ1	Лист	570	500	12	27	320	—
	»	Профиль, панель	600	550	12	20	330	1600
	В95пчТ2	Все полуфабрикаты	540	460	12	30	320	1500
	В95пчТ3	То же	500	410	12	34	310	1400
	В93пчТ2	Поковка, штамповка	470	440	10	30	310	1250
	В93пчТ3	То же	440	360	10	40	290	1150
	В96Ц3Т1	»	630	600	10	25	—	1750
	В96Ц3Т3	»	540	470	12	—	—	—
	В96Ц1Т1	Профиль	720	680	6	—	—	—
	В96Ц1Т2	»	660	630	8	14	—	—
Al—Cu—Li	ВАД23Т1	Лист	560	500	5	—	—	—
		Профиль, пруток	590	550	5	—	340	1500

Таблица 3.9. **Механические свойства алюминиевых заклепочных сплавов (проволока) [5]**

Система легирования	Сплав, состояние	$\tau_{ср}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	НВ, МПа
Al—Mg	АМГ5пМ	190	270	150	23	—	700
Al—Cu—Mg	Д18Т	210	300	170	24	50	700
	В65Т	260	400	250	20	50	900
	Д19пТ	290	460	280	20	40	1200
	Д16пТ	290	450	290	18	35	1200
Al—Zn—Mg—Cu	В95пТ1	340	580	510	8	—	1500
	В95пТ3	310	500	360	10	45	—

Таблица 3.10. **Механические свойства порошковых и высокомодульных алюминиевых сплавов [5]**

Система легирования	Сплав	Полуфабрикат	E, ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Al—Al_2O_3	САП-1	Профиль	72	210	300	20
	САП-1	Лист	72	300	340	10
	САП-2	Профиль	75	280	350	7
	САП-2	Лист	75	290	370	7
	САП-3	Пруток, полоса	77	300	400	4
Al—Si—Ni	САС-1-50	Пруток	100	210	340	2,5
	»	Труба	100	190	320	1,5
	САС-1-400	Пруток	100	170	270	2,5
Al—Be—Mg	АБМ1	Лист	135	300	450	16
	АБМ3	»	200	480	580	7

Таблица 3.11. **Механические свойства алюминиевых литейных сплавов** [3,5]

Обозначения способа литья: З — в землю; К — в кокиль; О — в оболочечные формы; В — по выплавляемым моделям; Д — под давлением

Система легирования	Сплав, состояние	Способ литья	$\sigma_в$, МПа	$\tau_{0,2}$, МПа	δ, %	$\tau_{ср}$, МПа	НВ, МПа
Жаропрочные сплавы							
Ал—Cu—Ni—Mg	АЛ1, АЛ1Т7	З	200—220	170—180	1	170	800—900
	АЛ1Т5	З	260	220	0,5	220	1000
	АЛ1Т5	К	300	260	1	—	1200
Al—Si—Cu—Mg	АЛ3Т5	З, О	250	170	1,5	—	750
	АЛ3Т5	З, К, В, О	210	—	1	—	700
	АЛ5Т5	З	260	210	1	—	800
	АЛ5Т7	З, К	240	180	1,5	—	900
	АЛ32Т5	З, К	240—260	170—190	2	—	600—700
	АЛ32Т6	З, К	250—270	180—220	1,5—2	—	600—700
	АЛ4МТ5	З	340	250	3	240	1000
	АЛ4МТ5	К	370	270	4	250	1100
	В124Т6	К	420	365	2,5	330	1200
	В124Т6	З	360	350	0,5	—	1100
Al—Cu—Mn	АЛ19Т4	З, К, В, О	320	210	10	—	850
	АЛ19Т5	З, К, В, О	375	280	5	—	1100
Al—Cu—Mn—Ni	АЛ33Т5	З	280	180	2	—	900
	АЛ33Т6	З	300	—	1	—	1000
Герметичные сплавы							
Al—Si (силумины)	АЛ2	З	175	80	6	—	550
		Д	215	115	2	—	—
	АЛ4Т6	З	260	200	4	145	700
	АЛ9Т4, Т5	З, К	290—210	110—120	2—4	—	600
	АЛ9-1Т5	З	270	150	5	—	—
		К	270	220	4	—	—
	АЛ9-1Т6	К	320	240	7	—	—
	ВАЛ8Т5	К	400	340	4	—	—
	АЛ34Т3	К	325	275	6	—	—
Коррозионно-стойкие сплавы							
Al—Mg	АЛ8Т4	З, В, К, О	300	170	12	230	600
	АЛ13Т4	З, В, К, О	160	100	1—3	—	550
	АЛ22Т4	З, О, В, К	240	180	1—3	—	900
	АЛ23Т4	К	250	140	10	—	600
	АЛ23-1	К	260	140	12	200	750
	АЛ23-1Т4	К	230	130	7	180	600
	АЛ27Т4	З, В, К	360	180	16	250	800
	АЛ27-1Т4	З, В, К	380	190	18	260	850
	АЛ28	З, В, К	205	—	4—5	—	550
	АЛ31Т4	З, К	360	160	25	—	—

Титановые сплавы

Химический состав сплавов — по ГОСТ 19807—74.

Таблица 3.12. **Механические свойства титановых сплавов [3,10]**

$E = 110 \div 120$ ГПа; $G = 42 \div 45$ ГПа; $\mu = 0{,}31 \div 0{,}34$

Сплав	Система легирования	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	$\tau_{ср}$, МПа	KCU, МДж/м²
Сплавы малой прочности после отжига							
ВТ1-0	99,28% Ti	350—500	300—420	30	60	—	—
ВТ1-1	99,04% Tl	450—600	380—500	25	50	300	—
ПТ7М	Ti—Al—Zr	480—680	—	20	—	—	0,8
ОТ4-0	Ti—0,8Al—Mn	500—650	—	30	—	—	—
ОТ4-1	Ti—2Al—1,5Mn	600—750	470	20	35—70	400	0,5—1,0
АТ2	Ti—Zr—Mo	600—750	—	20	—	—	—
ВТ1-1Л	99,04% Ti	450—600	—	20	40	—	0,5
Среднепрочные сплавы после отжига							
ОТ4	Ti—Al—Mn	700—900	600	15	45	—	0,35—1,0
ВТ5,	Ti—Al	750—950	650—700	15	25—40	600—650	0,4—0,5
ВТ5-1	Ti—Al—Sn	850—1000	—	12	—	—	—
ВТ4	Ti—Al—Mn	850—1000	800—900	10	—	—	—
ВТ6С	Ti—Al—V	950—1050	900	8	30	640	0,3—0,5
ВТ6	Ti—Al—V	930—1100	850—1000	10	20	—	0,6—1,2
ВТ14	Ti—Al—Mo—V	950—1100	850—1000	18	—	—	—
ВТ20	Ti—Al—Mo—V	700—900	620	7—12	18—25	—	0,35
ВТ5Л	Ti—Al	1000—1100	900—1000	5—10	10—20	—	0,15
ВТЛ-1	Ti—Al—Si	⩾850	—	⩾5	—	—	⩾0,25
ВТ6Л	Ti—Al—V	⩾900	850	⩾5	20	—	⩾0,3
ВТ20Л	Ti—Al—Zr—Mo	⩾1000	—	⩾4		—	⩾0,2
ВТ21Л	Ti—Al—Zr						
Высокопрочные сплавы после закалки и старения							
ВТ6	Ti—Al—V	1150	1050	8	30	—	0,25
ВТ14	Ti—Al—Mo—V	1150—1400	1080—1300	7	20	—	0,25
ВТ22	Ti—Al—Mo—V—Fe—Cr	1250—1400	1180—1300	5—8	35—50	—	0,3
		1080*	1000	18	40	—	—
ВТ23	Ti—Al—Mo—V—Fe—Cr	1300—1500	1200—1400	5	—	—	0,6
ВТ15	Ti—Al—Mo—Cr	1300—1500	1160—1400	3	—	—	0,2
ТС6	Ti—Al—V—Cr						
Жаропрочные сплавы после отжига							
ВТ8	Ti—Al—Mo—Si	1050	900	10	—	650	0,35
ВТ9	Ti—Al—Mo—Si—Zr	1150	1000	6	—	685	0,35
ВТ3-1	Ti—Al—Mo—Cr—Si—Fe	1000	950	12	—	635	0,4
ВТ9Л	Ti—Al—Mo—Fr	⩾950	—	⩾5	—	—	0,2

* После отжига.

Магниевые сплавы

Для обозначения состояний магниевых деформируемых сплавов принята следующая маркировка: М — отожженный; Н — нагартованный; Т1 — искусственно состаренный; Т4 — закаленный; Т6 — закаленный и искусственно состареиный; Т8 — закалениый, нагартованный и искусственно состаренный. Химический состав сплавов по ГОСТ 14957—76.

Литейные сплавы в зависимости от режима термической обработки отливок имеют дополнительные шифры при марке сплава: Т1 — искусственное старение; Т2 — отжиг; Т4 — закалка; Т6 — закалка и старение. Химический состав сплавов по ГОСТ 2856—79.

Магниевые сплавы, полуфабрикаты которых после горячей деформации или литья не подвергаются термической обработке, дополнительного шифра при марке сплава не имеют.

Таблица 3.13. **Механические свойства магниевых деформируемых сплавов [3,24]**

$E = 43$ ГПа; $G = 16$ ГПа; $\mu = 0{,}33$

Система легирования	Сплав, состояние	Полуфабрикат	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{пц}$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_{0,2\ сж}$, МПа	$\tau_{ср}$, МПа	KCU, МДж/м²
Сплавы малой и средней прочности										
Mg — Mn	МА1М	Лист	210	120	—	8	—	—	—	0,05
	МА1М	Пруток	240	150	—	4	6	85	130	0,06
Mg — Al — Zn — Mn	МА2	Пруток, штамповка	265	165	80	10	30	110	160	0,12
	МА2М	Лист	250	150	—	18	—	—	—	—
Mg —Mn	МА8	Пруток	260	150	—	7	—	—	150	0,1
	МА8М	Лист	250	160	—	18	—	—	—	—
	МА8Н	»	270	190	—	15	—	—	—	—
	МА9	Пруток	270	240	—	10	11	—	—	0,6
	МА9М	Лист	250	180	100	15	—	—	—	—
Высокопрочные сплавы										
Mg — Al — Zn — Mn	МА2-1	Плита, поковка, штамповка, профиль	275	170	100	12	—	85	140	0,08
	МА2-1									
	МА2-1М	Лист	280	180	—	16	—	—	—	—
	МА3, МА3М	Пруток, поковка, штамповка	275	220	100	13	25	—	140	0,1
	МА5Т4	То же	315	220	130	13	20	140	180	—
Mg — Zn — Zr	МА14Т1	Пруток	340	280	150	10	25	160	160	0,08
	МА14Т1	Штамповка, поковка	315	255	—	13	—	—	—	—
Mg — Al — Cd — Ag — Mn	МА10Т6	Пруток, профиль	400	295	130	5	8	240	—	0,03
Жаропрочные сплавы										
Mg — Ce — Mn	МА11Т6	Лист, пруток	270	140	80	10	12	120	170	0,04
Mg — Th — Zn	МА13Т8	То же	240	180	80	6	—	125	—	—
	ВМД1	Пруток	300	250	180	5	10	160	160	0,07
Сверхлегкие сплавы (плотность $d = 1400 \div 1600$ кг/м³; $E = 45 \div 46$ ГПа)										
Mg — Li — Zn	ВМД5	Пруток, штамповка	160—220	120—180	—	15—40	—	130—180	—	0,25—0,9
Mg — Li — Al — Cd	ИМВ-2	То же	210—280	160—250	—	8—20	—	180—240	—	0,05—0,1

Таблица 3.14. **Механические свойства магниевых литейных сплавов [3,24]**

$E = 42$ ГПа; $G = 15{,}5$ ГПа; $\mu = 0{,}34$

Система легирования	Сплав, состояние	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{пц}$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_{0,2\ сж}$, МПа	$\tau_{ср}$, МПа	KCU, МДж/м²	НВ, МПа
Среднепрочные сплавы										
Mg — Al — Zn	МЛ3	180	55	—	8	12	—	110	0,05	450
	МЛ7-1	180	70	—	6	8	—	—	0,03	550
Высокопрочные сплавы										
Mg — Al — Zn	МЛ4	170	95	—	4	6	—	130	0,02	500
	МЛ4Т4	235	85	18	7	15	—	135	0,04	580
	МЛ4Т6	240	115	45	4	6	—	145	0,02	675
	МЛ5	155	95	—	1,2	2,5	—	—	—	600
	МЛ5Т4	240	85	30	7	15	80	135	0,05	580
	МЛ5Т6	240	120	45	3	5	—	140	0,05	675
Mg — Zn — Zr	МЛ12	210	105	75	8	9	—	155	0,05	550
	МЛ12Т1	230	130	85	7	7	130	155	0,04	550
Mg — Zn — La — Zr	МЛ12Т6	250	150	85	6,5	7	130	155	0,04	675
	МЛ15Т1	215	140	80	3,5	5	140	150	0,02	550

Продолжение табл. 3.14

Система легирования	Сплав, состояние	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\tau_ш$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_{0.2\,сж}$, МПа	$\tau_{ср}$, МПа	KCU, МДж/м²	НВ, МПа
				Жаропрочные сплавы						
Mg — Nd — Zr	МЛ9Т6	240	145	75	3	6	140	170	0,03	650
	МЛ10Т6	240	120	70	5	7,5	100	170	—	650
Mg — Ce — Zn — Zr	МЛ11	130	100	40	3	3,5	100	—	—	600
	МЛ11Т4	150	90	40	5	7	90	120	0,03	600
	МЛ11Т6	160	105	45	3	5	105	120	0,03	650
Mg — Th — Zn — Zr	МЛ14Т1	200	95	50	8	—	—	—	—	600
Mg — Th — Zr	ВМЛ1Т6	200	95	50	6	—	—	—	—	—
	ВМЛ2Т6*1	260	120	60	6	8	120	170	0,07	650

*1 Не содержит токсичных и радиоактивных добавок

Медные сплавы и сплавы на основе олова и свинца

Медные сплавы разделяются на две основные группы: латуни и бронзы. Латуни — сплавы, легированные цинком (табл. 3.15 и 3.16). Различают простые и специальные латуни. Простые латуни (двойные сплавы) маркируют буквой Л, за которой следует содержание меди в процентах. В обозначении специальных латуней после буквы Л следуют заглавные буквы легирующих элемен-

Таблица 3.15. **Прочность и пластичность деформируемых латуней** [3,24]

Химический состав по ГОСТ 15527—70; $E = 102 \div 115$ ГПа

Тип латуни	Марка латуни	Мягкое состояние			Твердое состояние		
		$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ, МПа
Простая	Л96, Л90	240—260	50	550	450—470	2,5	1350
	Л85	280	50	570	550	3,5	1400
	Л80, Л70	320	50—55	600	655	4	1450
	Л68, Л62	300—320	45—55	600	700	4	1550
	Л63, Л60	400	45	640	705	3	1600
Алюминиевая	ЛА85-0,5	300	35	—	500	10	—
	ЛА77-2	380	50	550	600	9	1550
	ЛАЖ60-1-1	450	50	550	700	8	1700
	ЛАН59-3-3	550	45	1150	700	9	1800
Кремнистая	ЛК80-3	300	55	1000	650	4	1800
Марганцовистая	ЛЖМц59-1-1, ЛМц58-2, ЛМцА-57-3-1	380—450	40—60	800—950	680—750	5—10	1600—1850
Никелевая	ЛН65-5	400	60	600	700	4,5	1650
Оловянистая (морская)	ЛО90-1	280	45	570	520	4,5	1450
	ЛО70-1	350	60	600	700	4	1500
	ЛО62-1	400	40	800	700	7	1450
	ЛО60-1	380	40	770	580	4	1500
Свинцовая	ЛС74-3, ЛС64-2, ЛС63-3	300—400	40—60	500—700	550—700	2—6	1000—1200
Мунц-металл	ЛС59-1, ЛС60-1	300—450	35—55	500—800	500—650	5	1200—1600

Таблица 3.16. **Механические свойства литейных латуней [3,24]**

Химический состав — по ГОСТ 15527—70

Латунь	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	KCU, МДж/м²	НВ, МПа	Латунь	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	KCU, МДж/м²	НВ, МПа
ЛА67-2,5	380	150	15	—	900	ЛКС80-3-3	340	140	20	0,4	950
ЛАЖМц66-6-3-2	640	350	7	—	—	ЛМцОС58-2-2-2	340	240	8	—	950
ЛАЖ60-1-1Л	400	250	20	—	900	ЛМцЖ52-4-1	550	300	20	—	—
ЛК80-3Л	400	160	20	1,2	1050	ЛМцЖ55-3-1	550	250	10	—	1050
ЛМцС58-2-2	360	240	10	0,7	850	ЛС59-1Л	340	150	40	0,26	800

Таблица 3.17. **Механические свойства деформируемых бронз [3,24]**

Химический состав по ГОСТ 5017—74 и ГОСТ 18175—78

Бронза	E, ГПа	Мягкое состояние			Твердое состояние		
		$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ, МПа
БрОФ3-0,8, БрОФ7-0,2	116,5	400—500	60	850—1000	1100—1200	1	2000—2400
БрОФ6,5-0,4	112	450	60	900	800	7	2200
БрОФ4-0,25	100	340	50	650	600	8	1650
БрОЦ4-3	124	400	35	700	600	4,5	1600
БрОЦС4-4-2,5, БрОЦС4-4-4	73,5	350	30	700	600	2	1600
БрА5	120	400	65	650	800	4	2100
БрА7	120	470	70	750	1000	3	2200
БрАМц9-2	92	450	30	1100	800	4	1800
БрАЖ9-4	115	450	40	1100	700	4	2000
БрЖМц10-3-1,5	100	500	20	1400	700	9	2000
БрАЖН10-4-4	115	550	35	1500	830	9	2200
БрБ2, БрБНТ1,9, БрБНТ1,7	130	500	40	1400	900	2	—
БрМц5	105	330	40	800	600	—	1700
БрКМц3-1	115	400	50	900	750	6	1700
БрКН1-3	—	450	25	1000	600	6	2000
БрХ0,7	135	250	25	700	500	4,5	1400

тов и содержание меди в процентах, затем через тире — процентное содержание каждого легирующего элемента. Бронзы — сплавы, легированные различными элементами, за исключением цинка (табл. 3.17 и 3.18). Название бронза получает по основному легирующему элементу: так, сплав меди с алюминием называется алюминиевой бронзой, сплав меди со свинцом — свинцовой и т. д. Маркируют бронзы буквой Бр, в остальном повторяется система маркировки латуней. Сплавы, в которых основным легирующим элементом является никель, именуются медно-никелевыми и имеют специальные названия

Таблица 3.18. **Механические свойства литейных бронз [3,24]**

Химический состав — по ГОСТ 613—79

Бронза	Литье в кокиль			Литье в землю		
	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ, МПа
БрОЦСН3-7-5-1	210	5	600	180	8	600
БрОЦС3-12-5, БрОЦС5-5-5	180	4	600	150	6	600
БрОЦС3-5-7-5, БрОФ10-1	250	3	900	220	3	800
БрОЦ10-2	230	5	750	220	8	700
БрОЦ5-25	140	6	500	120	4	400
БрАЖ9-4Л	400	10	1000	500	12	1000
БрАЖМЦ10-3-1,5	400	12	1200	—	—	—
БрАЖН11-6-6	600	2	2500	600	2	2500
БрСуН6-2	260	6	810	—	—	—
БрСуФ6-1	220	5	800	—	—	—
БрСуСФ6-12-0,3	150	2	600	—	—	—

Таблица 3.19. **Механические свойства медио-никелевых сплавов [3,24]**

Химический состав — по ГОСТ 492—73

Название	Сплав	E, ГПа	Мягкое состояние		Твердое состояние	
			$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Мельхиор	МНЖМц30-0,8-1	145	400	45	600	4,0
»	МН19	140	350	40	550	4,0
Нейзильбер	МНЦ15-20	140	425	45	650	2,5
»	МНЦС16-29-1,8	125	400	42	650	3,0
Куниаль	МНА13-3	—	420	12	900	3,0
»	МНА6-1,5	—	400	35	700	5,0
Копель	МНМц43-0,5	120	420	38	650	3,5
Константан	МНМц40-1,5	165	430	28	670	2,5

(табл. 3.19). Деформируемые медные сплавы поставляются в мягком (отожженном и закаленном), полутвердом (обжатие 10—30%), твердом (обжатие 30—50%) и особо твердом (обжатие более 60%) состояниях.

Сплавы на основе олова или свинца — баббиты — маркируются буквой Б, за которой следует цифра, обозначающая содержание олова в сплаве (табл. 3.20).

Таблица 3.20. **Механические свойства баббитов [3]**

Сплав,	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$\sigma_{в,сж}$, МПа	$\sigma_{0,2сж}$, МПа	Укорочение при сжатии, %	НВ, МПа	KCU, МДж/м²
Оловянистые баббиты, химический состав — по ГОСТ 1320—71								
Б89	80	—	9	100	50	40	250	0,08
Б83	90	—	6	115	72	38	300	0,06
Свинцовооловянистые баббиты, химический состав — по ГОСТ 1320—74								
Б16	78	76	0,2	123	—	15	300	0,014
БН*	70	70	1,0	107	—	25	290	0,03
БТ**	67	54	11,5	103	—	—	220	0,05
Б6	68	—	0,2	120	—	23	300	0,015
Кальциевые баббиты химический состав — по ГОСТ 1208—78								
ДК	118	100	2,5	160	—	19	320	0,08
БК2	95	80	8	—	—	—	200	0,12

* Содержит никель.
** Содержит теллур.

Жаропрочные сплавы и сплавы на основе тугоплавких металлов

Таблица 3.21. **Механические свойства жаропрочных никелевых и кобальтовых сплавов [3,24]**

Сплавы, система легирования	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
1. Никелевые сплавы: деформируемые после закалки и старения				
ХН77ТЮ	1000	600	25	28
ХН77ТЮР	1000	650	20	21
ХН70ВМТЮ	1150	750	14	15
ХН70МВТЮБ	1050	700	16	16
ХН67МТЮБ	1050	650	25	25
литейные после нормализации				
ВЛ7-45У	500	—	5	9
ЖС3	740	—	8	14
ЖС3ДК	1050	—	8	13
ЖС6	1050	—	1	2
ЖС6К	1000	—	2,5	6
ЭП23	1250	—	2,5	11

Продолжение табл. 3.21

Сплавы, система легирования	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
деформируемые жаростойкие после нормализации				
ХН78Т	780	275	40	—
ХН75МБТЮ	850	400	45	—
ХН60В	800	320	60	—
ХН70Ю	720	—	75	—
ХН60Ю	710	—	60	—
2. Кобальтовые литейные сплавы после старения				
ЛК4*	700	—	8	10
ЛК4Я	900	—	5	5
4К66Я	900	—	6	7

* Литое состояние.

Таблица 3.22. **Прочность и пластичность сплавов на осиове тугоплавких металлов [3, 6, 24]**

Основа	Сплав, система легирования, состояние	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Вольфрам	W—30Re, рекристаллизованное	1400	5
	W—30Re, нерекристаллизованное	2200	6
Молибден	ВМ1 (Mo—Ti—Zr—Nb), ЦМ2А (Mo—Ti—Zr), ЦМ6 (Mo—Zr), ВМ2 (Mo—Ti—Zr—Nb) после отжига	800	—
	МР47ВП (Mo—47Re)	1750	—
Ниобий	ВН-2 (Nb—Mo), деформированное	750	23
	ВН2А (Nb—Mo—Zr), деформированное	850	4,5
	ВН-3 (Nb—Mo—Zr), деформированное	780	18
	ВН-4 (Nb—Mo—Zr—La или Ce), рекристаллизованное	800	16
	ВН-5А (Nb—Mo—Zr—La или Ce), рекристаллизованное	600	27
	РН-6(Nb—Mo—W—Zz), рекристаллизованное	890	—
	МН-1, рекристаллизованное	670	18
	МН-1, закаленное	760	17
	МН-2, рекристаллизованное	1050	4
Тантал	Та—10W, рекристаллизованное	950	25
	Та—10W, деформированное	1350	3
Хром	ВХ2, ВХ2И	400	—
	ВХ4	1100	—

Композиционные материалы

Композиционные материалы имеют ориентированную структуру и могут быть разделены на волокнистые материалы, матрица которых содержит упрочняющие одномерные наполнители (волокна, проволоки, нитевидные кристаллы), на слоистые композиции — набор чередующихся жестко связанных двумерных армирующих элементов (листов, фольг и т. п.) и на дисперсно-упрочненные материалы, содержащие равномерно распределенные и не растворяющиеся в несущей матрице ультрадисперсные частицы.

Таблица 3.23. **Механические свойства композиционных материалов однонаправленной структуры на полимерной матрице [12, 13]**

Наполнитель	Матрица	Объемное содержание наполнителя, %	ρ, кг/м³	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{в.сж}$, МПа	$\sigma_{в.изг}$, МПа	$\tau^*_{сдв}$, МПа	E, ГПа	KCU, МДж/м²	$\delta_р$, %
Борное волокно	Эпоксидная	50	2000	1600	2500	1600	100	210	0,06	0,4
	Полиамидная	50	2000	1000	1250	1550	60	250	0,11	—
Углеродная лента	Эпоксидная	50	1400	800	400	1000	30	120	0,05	0,5
	Полиамидная	52,5	1300	400	300	800	26	80	0,04	—
Углеродный жгут	Эпоксидная	60	1500	1100	450	1300	45	180	0,045	—
	Полиамидная	57,5	1400	910	400	1100	30	140	0,04	—
Органическое волокно	Эпоксидная	70	1350	1800	290	675	49	80	—	2,3
Стеклянное волокно	»	75	2000	1800	700	900	30	55	—	3

* При межслойном сдвиге.

Таблица 3.24. **Механические свойства композиционных материалов однонаправленной структуры на металлической матрице [5, 13, 14, 24]**

Наполнитель	Матрица	Объемное содержание наполнителя, %	ρ, кг/м³	$\sigma_в$, МПа	E, ГПа	Наполнитель	Матрица	Объемное содержание наполнителя, %	ρ, кг/м³	$\sigma_в$, МПа	E, ГПа
Борное волокно	Алюминий	50	2600	1350	240	Бериллиевая проволока	Сплав Al—Mg—Si	50	2300	680	195
То же	Сплав Al—Mg—Si	50	2600	1450	240	Молибденовая проволока	Сплав Ti—Al—V	30	6250	1400	195
»	Магний	50	2150	1200	220						
»	Магний литой	75	2400	1350	335	Вольфрамовая проволока	Никелевый литейный сплав	50	14000	700	—
Углеродное волокно	Алюминий	40—50	2200—2400	650—1250*	125—260*						
То же	Никель	50	5300	560	240	Нитевидные кристаллы SiO_2	Алюминий	50	2450	800	—
»	Цинк	35	5260	780	120						
»	Свинец	40	7350	730	205						
Стальная проволока	Алюминий	40	4740	1500	120	Частицы HfO_2**	Никель*	2,5	8900	510	—
		15	3470	850	90						
						Волокна SiC	Титан	25	4300	940	210

* В зависимости от типа углеродного волокна.
** Дисперсно-упрочненный матернал.

Таблица 3.25. **Механические свойства пластмасс [3,24]**

Пластмасса	ρ, кг/м³	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{в.изг}$, МПа	$\sigma_{в.сж}$, МПа	E, ГПа	$\delta_р$, %	KCU, 10^2 МДж/м²
Асботекстолит	1700	65	100	145	15	—	3
Виинпласт	1400	50	110	90	4,0	30	15
Гетинакс	1350	160	140	—	1,5	—	1,4
Дифлон	1200	70	105	85	—	50	13
Капрон	1140	55	95	90	1,0	100	11
Капрон вторичный	1150	35	45	60	—	—	2,5
Капрон, полиамид, анид стеклонаполненный	1350	130	200	115	6,5	2	2,5
Пенопласт ПС-1	100	—	—	1	0,05	—	0,11
Пенопласт ПХВ-1	200	4,5	4	2,6	0,18	6	0,15
Пенопласт ФК-20-СТ стеклонаполненный	450	10	—	24	—	—	0,7
Пенополиуретан ПУ10IT	200	—	—	3,3	—	—	0,04
Полиамид П-68	1110	50	80	90	1,5	100	15
Полиамид, наполненный тальком и графитом	1140	60	80	80	1,15	100	10
Полипропилен	910	32	75	100	1,15	600	—
Полистирол	1050	35	100	100	2,5	1,5	2
Политетрафторэтилен (Фторопласт-4)	2200	20	12,5	—	0,45	300	10
Политетрахлорэтилен (Фторопласт-3)	2120	37	70	50	1,15	30	2—16
Полиуретан	1200	55	75	—	0,01	55	1,1
Полиэтилен ВД	920	14	15	12	0,2	150	—
Полиэтилен НД	950	22—32	20—35	20—35	0,7	200	—
Пресс-материал	1400	50	60	200	5	—	1,2
Стекло органическое:							
неориентированное	1200	75	105	—	3	4	1,3
ориентированное СОЛ, СТ-1	1200	80	105	—	3	20	3
ориентированное 2-55, Т2-55	1200	105	150	—	4	3	3
Стекловолокнит АГ	1700	405	410	260	22	—	15
Стеклопластик СВАМ	1900	460	460	420	35	—	30
Стеклотекстолит КА СТ-В	1900	320	150	110	20	0,8	8
Стеклотекстолит ЭФ 32-301	1800	400	400	255	21	—	15
Стеклотекстолит ВФТ-С	1800	350	330	170	21	—	15
Текстолит ПТ	1300	85	140	130	10	1	3,5
Этрол ацетилцеллюлозный	1400	55	50	55	2,25	7	2
Этрол нитроцеллюлозный	1900	30	35	20	2,3	25—50	0,6
Этрол этилцеллюлозный	1200	12	34	17	2,2	50—100	1,5

Таблица 3.26. **Механические свойства металлокерамики* [3,24]**

Тип сплава	Металлокерамика, композиция	$\sigma_в$, МПа, при			φ, %	НВ, МПа
		растяжении	сжатии	изгибе		
Сплавы на основе железа	Спеченное железо	195	300	—	4	540
	То же после деформации 69—70%	275	370	—	6	760
	Спеченная углеродистая сталь	300	540	—	5	960
	Спеченная нержавеющая сталь после деформации 60—70%	565	720	—	16	1600
	Сплав 22Fe + 20Ni + Mo	1000	1650	—	7	2700
Твердые сплавы	WC—Co: ВК2, ВК3, ВК8	—	—	1000	—	900
	ВК10, ВК11, ВК15	—	—	1500	—	900
	WC—TiC—Co: Т5К10, Т14К8, Т15К8	—	—	1100	—	900
	Т30К4, Т60К6	—	—	750—900	—	900

* Изготавливаются методом порошковой металлургии.

Тип сплава	Металлокерамика, композиция	$\sigma_в$, МПа, при			ψ, %	НВ, МПа
		растяжении	сжатии	изгибе		
Тяжелые сплавы	W—Co—Ni(Cu, Cr)	1000	2800	—	—	2250
Фильтры	Бронза Cu—Sn	30—40	100—120	—	3	—
	Низкоуглеродистая сталь	1—7	30—250	—	—	—
	Нержавеющая сталь	5—120	—	—	0,8	—
Керметы	$70Al_2O_3 + 30Cr$	250	2300	390	—	—
	$80TiC + 20Co$	—	3150	1050	—	—

Таблица 3.27. **Механические свойства керамики [3, 24]**

Керамика	ρ, кг/м³	$\sigma_в$, МПа, при			E, ГПа
		растяжении	изгибе	сжатии	
Глиношамотная с грубозернистой структурой	2100	6—10	10—20	30—90	—
Глиношамотная с тонкозернистой структурой	2170	25	25—70	80—150	—
Фарфор	2350	30—60	50—120	400—500	—
Каменное литье	2900	—	40—65	330—450	90
Керамика из оксидов:					
Al_2O_3 (корунд)	3990	260	150	4000	382
Be_2O_3	3020	105	—	2100	272
MgO	3580	98	110	1400	214
ZrO_2	5600	148	233	2100	172
ThO_2	9690	100	—	1500	140

Таблица 3.28. **Механические свойства неорганических стекол и ситаллов [3, 24]**

Стекло, ситалл	ρ, кг/м³	$\sigma_в$, МПа, при			E, ГПа
		растяжении	изгибе	сжатии	
Стекло:					
кварцевое непрозрачное	2100	40	45	350	0,6
кварцевое прозрачное	2200	60	110	650	0,65
электровакуумное	2100—2500	50—100	—	800—200	0,65
электроизоляционное	2500	—	40—65	—	0,7
Ситалл:					
магнезиальный	2500—2850	—	160	—	0,12
пироксеновый	2900	—	400	—	0,14

Таблица 3.29. **Механические свойства резин [3]**

Резина	$\sigma_в$, МПа	$\delta_р$, %	Резина	$\sigma_в$, МПа	$\delta_р$, %
Амортизационная	10—16	400—600	Маслостойкая мягкая:	4—12	250—600
Губчатая	0,02—0,1	—	» средней твердости	4—16	200—350
Ячеистая и пористая из твердых каучуков	0,01—5	20—300	» твердая	4—20	120—300
			Морозостойкая на основе СК МС-10	15	200
Кислото- и щелочестойкая:					
на основе СКБ	4,5—10	200—350			
на основе СКС	20—25	300—500	Стойкая к гидравлическим жидкостям на основе СКН	13	—
на основе ХП	18—24	200—500			

Таблица 3.30. **Твердость минералов**

Минерал	Состав, химическая формула	Твердость по шкале Мооса	Другие свойства
Агат	SiO_2	6,5	$E = 98$ ГПа
Азурит	$2CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$	3,5	—
Алмаз	C	10	$E = 740 \div 1000$ ГПа; $\sigma_в = 240 \div 480$ МПа; $H_\mu = 10\,000$ ГПа
Альмандин (гранат)	$Fe_3Al_2[SiO_4]_3$	8	$H_\mu = 1230$ ГПа
Андрадит (гранат)	$Ca_3Al_2[SiO_4]_3$	7	—
Андалузит	Al_2SiO_5	7	—
Барит	$BaSO_4$	3,5	—
Берилл	$Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$	8	$H_\mu = 1120 \div 1450$ ГПа
Виллемит	$Zn_2[SiO_4]$	5,5	—
Волластонит	$CaSiO_2$	4,5	$\sigma_{в.\,изг} = 1120 \div 1450$ ГПа
Галенит	PbS	2,5	—
Галлит	NaCl	2	—
Гематит	$FeSiO_2$	6	—
Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2	—
Горный хрусталь	SiO_2	7	—
Графит	C	1,5	$\sigma_в = 4,5 \div 6$ МПа: $\sigma_{в.\,еж} = 15 \div 29$ МПа; $H_\mu = 6,8 \div 11,8$ ГПа
Гроссуляр (гранат)	$Ca_3Al_2[SiO_4]_3$	7	—
Кальцит	$CaCO_3$	3	—
Кварц	SiO_2	7	$H_\mu = 1100$ ГПа
Кианит	Al_2SiO_5	6	—
Корунд	Al_2O_3	9	$H_\mu = 2050$ ГПа
Крокидолит-асбест	$3H_2O \cdot 2Na_2O \cdot 6(Fe, Mg)O \cdot 2Fe_2O_3 \cdot 17SiO_2$	4	—
Лазурит	$(Na, Ca)_{1-8}[AlSiO_4]_6[SO_4\ Cl, S]_{1-2}$	5,5	—
Магнезит	$MgCO_3$	4	$\sigma_{в.\,сж} = 88,5$ МПа
Малахит	$Cu_2[CO_3](OH)_2$	4	—
Миллерит	NiS	4	—
Муллит	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	6	$E = 35$ ГПа
Мусковит	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	2,5	$\sigma_в = 170 \div 355$ МПа; $\sigma_{в.\,сж} = 420 \div 540$ МПа
Опал	$SiO_2 \cdot H_2O$	6	—
Перовскит	$CaTiO_3$	6	—
Пиролюзит	MnO_2	5,5	—
Пироп (гранат)	$Mg_3Al_2[SiO_4]_3$	7	—
Пирофиллит	$Al_2[Si_4O_{10}][OH]_2$	1,5	—
Реальгар	AsS	2	—
Рутил	TiO_2	6	—
Сепиолит	$2MgO \cdot 3SiO_2 \cdot nH_2O$	2,5	—
Силлиманит	Al_2SiO_5	7	$\sigma_{в.\,сж} = 45 \div 60$ МПа
Спессартин (гранат)	$Mn_3Al_2[SiO_4]_3$	7	—
Тальк	$Mg_3[Si_{14}O_{10}][OH]_2$	1	—
Топаз	$Al_2[SiO_4][FeOH]_2$	8	—
Турмалин	$[Ni, Ca](NaAl)_6[Si_6Al_3B_3(O, OH)_{30}]$	7	—
Уваровит (гранат)	$Ca_3Cr_2[SiO_4]_3$	7	—
Флогопит	$KMg_2[Si_3AlO_{10}][Fe, OH]_2$	2,5	$\sigma_{в.\,сж} = 205 \div 265$ МПа
Флюорит	CaF_2	4	—
Хризоберилл	Al_2BeO_4	8,5	—
Хризотил-асбест	$H_4Mg_3Si_2O_9$	—	$E = 158 \div 210$ ГПа; $\sigma_{в.\,сж} = 590 \div 785$ МПа
Циркон	$ZrSiO_4$	7,5	—
Шеелит	$CaWO_4$	5	—
Шорломит (гранат)	$Ca_3(Al, Fe, Ti)(Si, Ti)O_4]_3$	7	—

Таблица 3.31. **Механические свойства волокон [3]**

Волокно	$L_p \cdot 10^{-3}$ м в сухом состоянии	Потери прочности в мокром состоянии, %	Удлинение, %, в состоянии		$\sigma_в$, МПа	E, ГПа
			сухом	мокром		
Натуральные волокна						
Асбест	—	—	—	—	300	155—205
Бамбук	—	—	—	—	345	33
Лен:						
технический	40	0	2—3	2—3	490—590	—
элементарный	63	0	2—2,5	2—2,5	785—980	—
Хлопок:						
средневолокнистый	24	0	6—8	7—9	245—390	—
тонковолокнистый	35	0	6—8	7—9	390—540	—
Шелк	35	20—30	15—20	20—25	440—490	—
Шерсть:						
грубая	12	30—35	25—30	25—35	145—195	—
тонкая	14	30—35	30—50	—	195—245	—
Химические волокна						
Альгинат	10—14	60—70	10—14	25—26	—	
Ацетат (виполян, викара, адрил)	11—14	40—45	22—30	28—35	175—215	—
Белковое (казеин)	7—13	40—60	30—50	50—70	90—155	—
Винилон, винил	80—100	10—15	8—10	13—18	1030—1270	2,5—10,8
Вискозное кордное:						
обычное	27—30	35—40	10	16	340—390	3,9—5,9
высокопрочное	40—55	25—30	15	25	640—735	11,8—24,5
Вискозное:						
медноаммиачное	15—23	35—40	10—17	15—30	225—315	—
штапельное	15—20	55	20—25	20—30	225—300	—
Ветрелон (полиамидное)	23—29	6	13—18	15—19	—	2,7
Гидратцеллюлоза	30—40	20	8—10	12—13	—	8—9,8
Капрон, нейлон, дедерон	40—50	10	20—25	—	480—625	—
Лавсан	45—55	0	9—12	15—18	450—540	—
Нитрон, орлон	45—55	2—6	14—17	14—16	510—610	—
Совиден	16—36	0	15—25	—	260—590	—
Триацетат, ариел. курплет	10—15	20—25	20—23	35—40	135	4,5
Фторлон	45—55	0	6—9	6—9	880—1050	14,7

Таблица 3.32. **Механические свойства волокон, проволоки и нитевидных кристаллов для армирования композиционных высокопрочных и высокомодульных материалов [14, 15, 24]**

Волокно, проволока, кристалл	ρ, кг/м³	$\sigma_в$, ГПа	E, ГПа	$\delta_р$, %	Волокно, проволока, кристалл	ρ, кг/м³	$\sigma_в$, ГПа	E, ГПа	$\delta_р$, %
Волокно:					стальная	7800	3,5—4	200	2—2,5
борное	2630	2,5—3,5	380—450	0,7—0,8	титановая	4500	1,5—2	120	1,8—2
углеродное	1700	2—3,2	200—500	0,7—1,0	молибденовая	10 000	1,75	350	1,3
стеклянное	2540	3,9—4,6	95—100	4—5	Нитевидные кристаллы («усы»):				
органическое	1350	2,8—3,5	120—130	2—2,5	графита	2260	21	100	—
карбида кремния	3210	2—4	400—500	0,3—0,5	оксида алюминия	3960	28—42	500	—
оксида алюминия	3960	2,1—2,6	500	—	нитрида алюминия	3300	15	380	—
оксида циркония	6270	2,4—2,7	480	—	карбида кремния	3210	21—37	580	—
Проволока:					нитрида кремния	3180	15	495	—
бериллиевая	1840	1—1,5	290—320	—					
вольфрамовая	19 300	2,4—4,2	400	2—3					

3.3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ НИЗКИХ И ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Механические свойства при температуре ниже 20 °С определяются по ГОСТ 11150—84, выше 20 °С — по ГОСТ 9651—84. Методы определения ползучести и длительной прочности регламентируются ГОСТ 3248—81 и ГОСТ 10145—80 соответственно.

Температурные зависимости механических свойств для каждого класса материалов достаточно близки. Наиболее чувствительны к влиянию температуры свойства, характеризующие сопротивление пластической деформации (твердость, пределы прочности и текучести), а также ударная вязкость. Упругие свойства металлов и сплавов изменяются с температурой в меньшей степени. Напротив, модуль упругости некоторых неметаллических материалов с понижением температуры до —60 °С может снижаться более чем в 2 раза.

В табл. 3.33—3.46 и на рис. 3.2—3.21 при температурах от —253 до +2400 °С приведены характеристики E, $\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$, δ, ψ и KCU, определение которых дано в § 3.1, а также $\sigma^t_{0,2/\tau}$ и σ^t_τ при высоких (до +1600 °С) температурах, где $\sigma^t_{0,2/\tau}$ — предел ползучести — наибольшее постоянное напряжение, которое за определенное время τ (обычно 100 или 1000) при постоянной температуре t вызывает остаточную деформацию, не превышающую заданного значения (как правило, 0,2%); σ^t_τ — предел длительной прочности — наибольшее постоянное напряжение, вызывающее разрушение за определенное время τ при постоянной заданной температуре t.

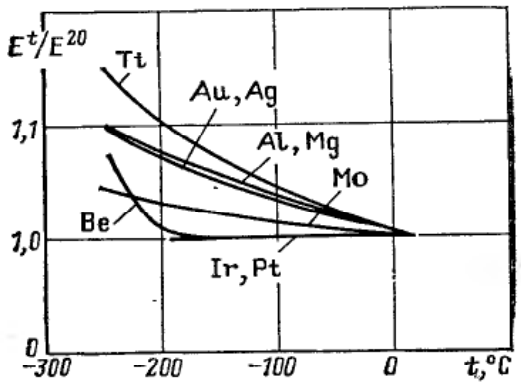


Рис. 3.2. Зависимость модуля упругости некоторых материалов от температуры [3, 6] (значения модуля упругости при 20 °С см. в табл. 3.1)

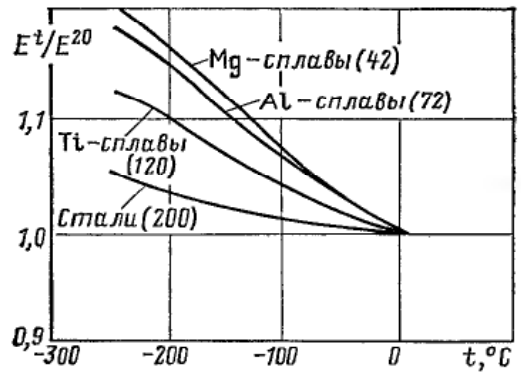


Рис. 3.3. Зависимость модуля упругости сталей и сплавов от температуры [3, 5, 10]. (В скобках — значения модуля упругости при 20°С — $E^{20}_{ст}$, ГПа)

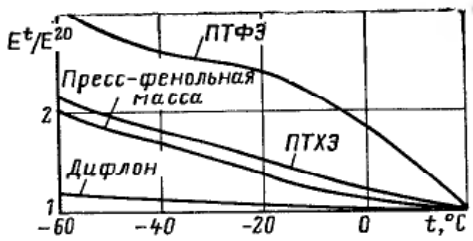


Рис. 3.4. Зависимость модуля упругости металлов от температуры [24], для дифлона E^{20}=2,45 ГПа, для ПТХЭ (фторопласта-3) E^{20}=1,45 ГПа, для ПТФЭ (фторопласта-4) E^{20}=850 МПа, для пресс-фенольной массы E^{20}=7,9 МПа)

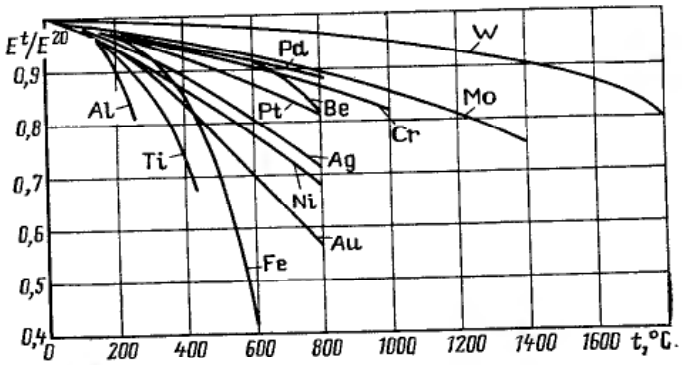


Рис. 3.5. Зависимость модуля упругости металлов от температуры [3, 6]. Значения модуля упругости при 20 °С см. в табл. 3.1)

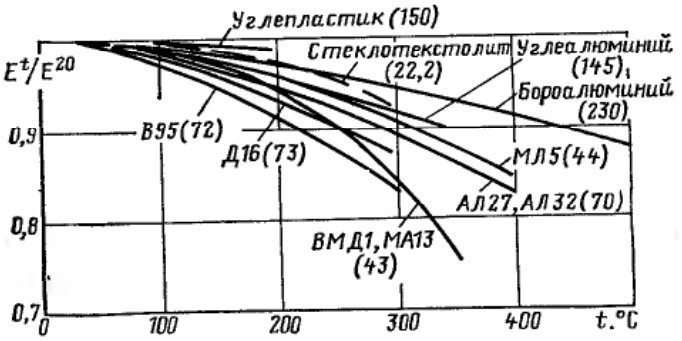


Рис. 3.6. Зависимость модуля упругости материалов от температуры с повышением ее до 500 °С [3, 14, 24]. (В скобках — значения модуля упругости при 20 °С — $E^{20}_{дин}$, ГПа)

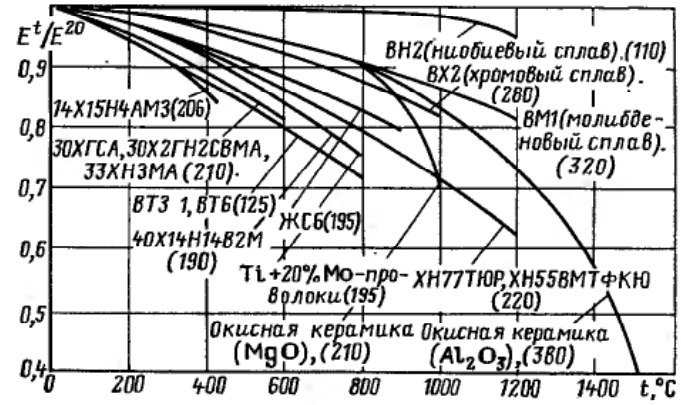


Рис. 3.7. Зависимость модуля упругости материалов от температуры с повышением ее до 1200 °С [3, 24]. (В скобках — значения модуля упругости при 20°С — $E^{20}_{дин}$, ГПа)

Таблица 3.33. **Механические свойства металлов при низких температурах [3, 6, 11]**

Металл	$\sigma_в$, МПа, при t, °С			$\sigma_{0,2}$, МПа, при t, °С			δ, %, при t, °С			ψ, %, при t, °С		
	20	—196	—253	20	—196	—253	20	—196	—253	20	—196	—253
Алюминий	120	210	350	—	—	—	30	42	45	85	75	65
Бериллий	300	270	—	200	230	—	—	—	—	—	—	—
Ванадий	420	1080	—	—	—	—	14	3,5	—	—	—	—
Железо	360	830	1060*	260	780	1060*	27	4	0,6*	88	54	73*
Магний	120	160	210	—	—	—	5	5	5	10	7	8
Медь	240	380	460	—	—	—	29	41	46	70	72	74
Молибден	490	540	540	—	—	—	3	0	0	3	3	4
Натрий	14	19	40	—	—	—	19	13	60	—	—	—
Никель	390	600	750*	125	145	145*	54	61	62*	85	80	75*
Ниобий	350	1030	1120	—	—	—	30	—	7	—	—	—
Олово	36	71	73	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Свинец	28	45	70	—	—	—	26	34	36	—	—	—
Серебро	180	290	360	—	—	—	39	82	88	90	88	80
Тантал	620	1030	1150*	560	1030	1150*	13	6	0,6*	69	74	77*
Титан	750	1190	1340*	660	1080	1340*	18	12	1*	48	16	4*
Титан иодидный	250	630	—	154	440	—	50	11,5	—	78	28	—
Цирконий иодидный	260	470	680*	140	230	160*	35	49	47*	52	58	52*

* При температуре —269 °С.

Таблица 3.34. **Прочность сталей и сплавов при низких температурах [3, 5, 19]**

Сталь, сплав, термическая обработка	$\sigma_в$, МПа, при t, °С				$\sigma_{0,2}$, МПа, при t, °С			
	20	—70	—196	—253	20	—70	—196	—253
Стали								
Ст. 45, нормализация	600	—	1050	1400	400	—	950	1400
Ст. 45, закалка и отпуск	1000	1050	1320	—	890	960	1280	—
30ХГСА, закалка и отпуск	1200	1300	1580	—	1100	1180	1500	—
40ХНМА, закалка и отпуск	1100	1300	1550	—	980	1080	1400	—
30ХГСНА, изотермическая закалка	1600	1700	1900	—	1200	1230	1450	—
40ХГСН3ВА, закалка и отпуск	2100	2200	2400	—	1450	1480	1700	—
12Х18Н9Т, закалка	620	1150	1650	1900	250	300	370	420
08Х15Н5Д2Т, закалка и отпуск	1150	1230	1500	1750	1000	1080	1350	1650
10Х12Н20Т3Р, закалка и старение	1080	—	1100	1450	620	—	1100	880
12Х14Г14Н3Т, закалка	750	—	1400	1500	500	—	500	600
08Х16Н6, закалка, обработка холодом, старение	1350	1500	1750	1850	1250	1350	1650	1800
45Л, отпуск	770	850	—	—	—	—	—	—
27ХГСНЛ, изотермическая закалка	1450	1500	—	—	1250	1350	—	—
35ХГСЛ, закалка и отпуск	950	1030	1350	—	—	—	—	—
Титановые сплавы								
ВТ5-1, отжиг	750	950	1350	1600	650	850	125	1550
0Т4, отжиг	810	870	1220	1500	660	830	115	1300
ВТ6, отжиг	100	120	1650	1850	950	1150	155	1750
ВТ5Л	850	1000	1350	1500	820	950	1300	1300
ВТ20Л	1000	1100	—	—	—	—	—	—
ВТ21Л	1100	1200	—	—	—	—	—	—
Алюминиевые сплавы								
АД1М	80	95	170	260	30	30	40	54
АМГ6М	320	350	470	545	170	175	185	195
АД33Т1	310	350	410	530*	270	310	350	390*

Продолжение табл. 3.34

Сталь, сплав, термическая обработка	$\sigma_в$, МПа, при t, °С				$\sigma_{0.2}$, МПа, при t, °С			
	20	—70	—196	—253	20	—70	—196	—253
Д16Т	440	470	550	700	290	330	420	520
Д16Т1	495	535	685	720*	455	490	575	625*
1201Т1	430	460	530	680	320	380	410	490
В92Т1	440	470	510	610	320	330	360	400
В93Т1	490	520	580	—	450	470	530	—
В95Т1	600	620	750	810	550	560	640	730
САП-1	320	380	480	560	220	260	350	450
АБм1	400	420	530	—	280	280	400	—
АЛ4Т6	350	420	370	470	320	320	360	450
АЛ19Т4	320	320	370	390	210	210	250	330
АЛ9Т5	210	245	270	—	90	—	—	—
ВАЛ8Т5	400	430	480	—	340	—	—	—
АЛ27Т1	350	430	300	270	250	230	280	260
Магниевые сплавы								
МА2М	250	300	370	430	140	180	210	230
МА2-1М	270	290	380	—	180	—	315	—
МА14Т1	320	410	470	480	260	360	380	400
МЛ4	200	200	220	—	—	—	—	—
МЛ5Т6	240	240	240	—	—	—	—	—
МЛ10Т6	240	300	320	—	—	—	—	—
МЛ15Т1	210	210	220	—	—	—	—	—
Медные сплавы								
ЛС59, мягкая	450	—	590	680	—	—	—	—
БрОФ6,5—0,4, твердая	630	—	840	950	—	—	—	—
Никелевые сплавы								
ХН77ТЮР, закалка и старение	1300	—	1360	—	690	—	800	—
ХН77ТЮ, закалка и старение	1200	—	1600	1050	600	—	650	500
ЖСКП	1400	—	1650	1630	1000	—	1200	1280

* При температуре —269 °С.

Таблица 3.35. **Пластичность и вязкость сталей и сплавов при низких температурах [3,5,19]**

Сталь, сплав, термическая обработка	δ, %, при t, °С				ψ, %, при t, °С				KCU, МДж/м², при t, °С		
	20	—70	—196	—253	20	—70	—196	—253	20	—70	—196
Стали											
45, нормализация	—	—	—	—	55	—	38	0	—	—	—
45, закалка и отпуск	13	—	13	—	52	52	48	—	1	0,6	0,1
30ХГСА, закалка и отпуск	14	14	7	—	50	47	13	—	0,7	0,4	0,15
40ХНМА, закалка и отпуск	17	13	12	—	55	50	27	—	1,1	6	0,4
30ХГСНА, изотермическая закалка	13	14	2,5	—	52	53	—	—	0,9	0,45	0,1
40ХГСН3ВА, закалка и отпуск	11	13	10	—	43	45	14	—	0,55	0,55	0,15
12Х18Н9Г, закалка	40	37	30	25	—	—	—	—	1,3	1,6	2,0
08Х15НД2Т, закалка и отпуск	10	11	13	8	50	48	47	35	—	—	—
10Х12Н20Т3Р, закалка и старение	30	—	30	10	—	—	—	—	—	—	2,2
12Х14Г14Н3Т, закалка	45	—	40	35	—	—	—	—	—	—	—
08Х16Н6, закалка, обработка холодом, старение	—	—	—	—	58	53	45	40	1,5	2,3	2,2
45Л, отпуск	18	17	—	—	35	20	—	—	0,75	0,35	—
27ХГСНЛ, изотермическая закалка	8	10	—	—	45	40	—	—	0,6	0,35	—
35ХГСЛ, закалка и отпуск	15	15	6	—	50	50	10	—	—	—	—

Продолжение табл. 3.35

Сталь, сплав, термическая обработка	δ, %, при t, °С				ψ, %, при t, °С				KCU, МДж/м², при t, °С		
	20	—70	—196	—253	20	—70	—196	—253	20	—70	—196
Титановые сплавы											
ВТ5-1, отжиг	10	8	6	3	—	—	—	—	—	—	—
0Т4, отжиг	24	15	12	—	—	—	—	—	0,5	0,3	0,2
ВТ6, отжиг	16	15	12	3	33	33	30	4	0,4	—	0,3
ВТ5Л	9	11	8	3	25	25	14	14	—	—	—
ВТ20Л	10	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ21Л	10	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Алюминиевые сплавы											
АД1М	35	45	50	45	—	—	—	—	—	—	—
АМГ6М	17	23	31	34	29	50	33	27	—	—	—
АД33Т1	15	—	20	23*	42	—	39	34*	—	—	—
Д16Т	14	13	10	16	16	16	15	—	0,24	0,24	0,24
Д16Т1	8	6	7,5	9,5*	17	14	13	14*	—	—	—
1201Т1	10	11	13	10	—	—	—	—	—	—	—
В92Т1	14	19	17	11	—	—	—	—	—	—	—
В93Т1	7	8	6	—	—	—	—	—	—	—	—
В95Т1	10	9	7	5	13	15	9	—	0,15	0,1	0,1
САП1	5	7	8	10	—	—	—	—	—	—	—
АБМ1	15	16	35	—	20	16	—	—	—	—	—
АЛ4Т6	3,5	2,5	2,5	1	5	6,5	3,5	3	0,03	0,03	0,03
АЛ19Т4	9,5	9,5	6	5	—	—	—	—	—	—	—
АЛ9Т5	2	2,5	2,8	—	—	—	—	—	—	—	—
ВАЛ8Т5	4	4	3,5	—	—	—	—	—	—	—	—
АЛ27Т1	15	25	2	0,1	20	28	3	0,5	—	—	—
Магниевые сплавы											
МА2М	25	23	10	8	—	—	—	—	—	—	—
МА2-1М	15	9	2,5	—	—	—	—	—	—	—	—
МА14Т1	13	8	2,5	—	—	—	—	—	—	—	—
МЛ4	8	6	5	—	12	9	4	—	—	—	—
МЛ5Т6	5,5	4	2	—	7	5	4	—	0,035	0,025	0,02
МЛ10Т6	5	5	4	—	—	—	—	—	—	—	—
МЛ15Т1	3,5	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—
Медные сплавы											
ЛС59, мягкая	32	—	37	34	35	—	38	35	—	—	—
Бр0Ф6,5—4, твердая	12	—	29	29	61	—	54	51	—	—	—
Никелевые сплавы											
ХН77ТЮР, закалка и старение	25	—	18	—	20	—	15	—	0,5	—	0,35
ХН77ТЮ, закалка и старение	28	—	30	18	35	—	28	8	—	—	—
ЖС6КП, закалка	20	—	15	13	—	—	—	—	—	—	—

* При температуре —269 °С.

Таблица 3.36. **Механические свойства сталей при высоких температурах [3,24]**

Стали	$\sigma_в$, МПа, при t, °С						$\sigma_{0,2}$, МПа, при t, °С						δ, %, при t, °С					
	20	200	300	400	500	600	20	200	300	400	500	600	20	200	300	400	500	600
10	430	495	525	380	260	110	265	225	180	170	160	95	—	—	—	—	—	—
20	480	440	450	360	220	130	270	230	180	150	130	90	—	—	—	—	—	—
45	640	700	730	575	385	220	365	355	265	230	180	80	—	—	—	—	—	—

Стали	$\sigma_в$, МПа, при t, °С						$\sigma_{0,2}$, МПа, при t, °С						δ, %, при t, °С					
	20	200	300	400	500	600	20	200	300	400	500	600	20	200	300	400	500	600
38ХА, 40Х	950	900	890	700	500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
40ХФА	950	925	860	—	505	385	860	825	760	720	420	—	26	22	19	29	30	50
30ХМА	950	800	—	740	570	—	750	650	—	600	500	—	12	20	—	19	19	—
30ХГСА, 40ХНМА	1100	—	1000	920	700	550*	950	—	840	800	650	500*	13	—	11	16	21	27*
12Х2НВФА	1150	—	1020	1050	1020	—	950	—	900	920	920	—	17	—	14	15	12	—
30Х2Н2ВФА	1180	—	—	1050	920	—	1090	—	—	930	860	—	15	—	—	12	12	—
30ХГСН2А	1600	1600	—	1500	1150	—	1350	1350	—	1250	1050	—	9	9	—	11	9	—
12Х18Н10Т	650	—	450	450	450	400	300	—	200	180	180	180	40	—	30	30	30	25
14Х17Н2	1200	—	1120	—	950	380	900	—	840	—	—	—	8	—	8	—	16	30
09Х15Н9Ю	1200	1130	1050	1000	750	—	950	900	850	800	500	—	10	8	8	8	10	—
08Х17Н5М3	1200	—	—	1100	950	750*	1000	—	—	850	600	500*	10	—	—	—	—	10*
20Л	440	430	450	370	230	—	260	240	200	170	130	—	30	22	21	32	45	—
20ХМФЛ	600	580	550	520	480	350	400	400	390	370	340	280	18	14	13	14	15	20
30ХНВЛ	850	790	820	720	580	330	700	630	600	560	500	300	18	16	16	14	15	19
12Х13Н3ВФЛ	900	—	—	780	620	400	750	—	—	610	480	270	10	—	—	6	9	17
23Х6Н2МВФА	920	—	730	650	550	370	700	—	610	570	520	340	12	—	14	15	16	24
08Х17Н3СЛ	1200	—	—	1130	1040	—	1100	—	—	970	910	—	8	—	—	6,5	7	—

* Испытано при температуре 550 °С.

Таблица 3.37. **Механические свойства титановых сплавов при высоких температурах [3,10]**

Сплав	$\sigma_в$, МПа, при t, °С						$\sigma_{0,2}$, МПа, при t, °С						δ, %, при t, °С					
	20	200	300	400	500	600	20	200	300	400	500	600	20	200	300	400	500	600
ВТ1-1	450	—	220	150	—	—	380	—	180	150	—	—	25	—	30	35	—	—
0Т4-1	650	—	380	310	—	—	470	—	290	260	—	—	20	—	23	17	—	—
0Т4	750	—	490	460	—	—	600	—	430	390	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ5	800	—	480	—	—	—	700	—	380	350	—	—	15	—	—	—	—	—
ВТ5-1	750	680	550	510	490	380	650	—	460	—	—	—	15	10	17	15	20	26
АТ4	900	—	680	600	—	—	850	—	600	550	—	—	15	—	17	20	—	—
ВТ6	1000	—	—	580	530	—	900	—	—	500	420	—	8	—	—	9	16	—
ВТ6С	920	670	—	—	510	—	870	580	—	—	400	—	10	11	—	—	15	—
ВТ8	1070	860	830	770	730	600	920	710	690	630	570	400	10	10	9	8	8	9
ВТ9	1150	950	920	850	800	720	1030	—	740	720	660	550	6	—	10	7	7	9
ВТ3-1	1000	910	840	760	700	530	950	740	660	630	560	250	12	11	9	8	10	18
ВТ20	1000	780	730	700	650	470	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ5Л	900	—	400	350	300	—	—	—	—	—	—	—	8	—	8	10	13	—
ВТ6Л	900	—	550	500	—	—	—	—	—	—	—	—	9	—	9	9	—	—
ВТ9Л	950	—	710	560	640	250*	—	—	—	—	—	—	9	—	9	7	8	5*
ВТ20Л	1000	—	670	610	560	—	—	—	—	—	—	—	10	—	10	10	12	—
ВТ21Л	1100	—	700	670	630	—	—	—	—	—	—	—	10	—	10	11	12	—

* При температуре 800 °С.

Таблица 3.38. **Механические свойства алюминиевых сплавов при высоких температурах [3,5]**

Сплав, состояние	$\sigma_в$, МПа, при t, °С						$\sigma_{0,2}$, МПа, при t, °С						δ, %, при t, °С					
	20	100	150	200	250	300	20	100	150	200	250	300	20	100	150	200	250	300
АД1М	80	—	60	42	28	18	30	—	29	25	17	10	35	—	55	65	75	80
АД1Н	150	135	110	42	28	18	100	70	45	28	14	10	6	7	11	55	65	80
АМг2М	190	170	160	130	110	70	80	80	70	60	—	—	23	26	35	50	60	75
АМг2П	260	260	220	160	80	50	210	210	190	100	50	35	14	16	25	40	80	100
АМг2Н	290	—	250	160	90	50	260	—	210	100	70	30	8	—	25	40	60	100
АМг6М	320	300	250	190	160	130	170	150	130	120	100	80	24	30	37	43	45	48
АД33Т1	310	—	240	200	—	90	270	—	200	180	—	80	2	—	11	11	—	8
АК8Т1	490	—	410	340	230	—	450	—	370	310	220	—	1	—	14	13	14	—
Д1Т	410	—	280	150	90	50	250	—	210	110	65	35	15	—	16	28	45	95

Сплав, состояние	$\sigma_в$, МПа, при t, °С						$\sigma_{0,2}$, МПа, при t, °С						δ, %, при t, °С					
	20	100	150	200	250	300	20	100	150	200	250	300	20	100	150	200	250	300
Д16Т*	440	—	380	330	220	150	290	—	265	255	195	115	19	—	19	11	13	13
	520	—	440	420	290	190	380	—	—	—	—	—	16	—	14	9	10	12
ВАД1Т	430	—	—	340	270	170	280	—	—	230	210	140	18	—	—	20	16	18
АК4-1Т1	420	—	360	320	250	—	360	—	330	290	230	—	7	—	7	10	11	—
Д20Т1	420	—	350	300	230	—	320	—	280	250	190	—	10	—	13	14	15	—
1915Т1	380	325	290	250	—	—	310	280	250	—	—	—	10	14	18	—	—	—
В92Т1	480	410	330	280	—	—	370	300	270	240	—	—	7	10	16	14	—	—
В93Т1	490	430	380	—	—	—	450	400	340	—	—	—	7	6	4	—	—	—
В95Т1*	520	480	410	280	150	—	440	410	350	240	120	—	14	14	15	11	16	—
	600	530	430	330	160	—	550	500	400	310	150	—	8	8	7	—	16	—
АЛ1Т5	—	—	—	180	175	130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,5	1,9	4
АЛ3Т5	220	—	—	180	150	100	—	—	—	—	—	—	0,8	1	1	1,4	1,5	4
АЛ32Т5, Т6	245	—	225	210	150	—	180	—	175	170	125	—	2	—	2,5	4	4	—
АЛ4МТ5	340	300	280	260	180	145	250	—	—	—	—	—	3	2	2,5	3	3,5	6
АЛ4Т6	240	220	190	160	110	—	—	—	—	—	—	—	3	3	3,5	4	5,4	5
В124Т6	360	—	—	300	220	130	—	—	—	—	—	—	0,5	—	—	1	1,5	2,5
В124Т6К**	415	—	—	310	210	140	—	—	—	—	—	—	2,5	—	—	3,5	4	6
АЛ19Т5	370	—	—	280	200	150	280	—	—	220	160	100	5	—	—	3	4	5
АЛ33Т5***	280	—	—	—	210	160	180	—	—	—	150	100	2	—	—	—	2	2,5
АЛ9-1Т5	270	—	210	210	140	—	150	—	150	170	130	—	5	—	15	6	4	—
АЛ9-1Т6К**	320	—	240	200	130	—	240	—	200	180	120	—	7	—	12	6	6	—
ВАЛ8Т5К**	400	—	340	300	220	130	—	—	—	—	—	—	4	—	8	9	10	11

* В числителе для катаных полуфабрикатов, в знаменателе — для прессованных.
** Литье в кокиль, остальные — в землю.
*** При температуре 350 °С: $\sigma_в$=100 МПа; $\sigma_{0,2}$=70 МПа; δ=5 %.

Таблица 3.39. **Прочность порошковых алюминиевых сплавов и композиционных материалов на алюминиевой и магниевой матрице при высоких температурах [5,14,24]**

Материалы	$\sigma_в$, МПа, при t, °С							
	20	100	200	250	300	350	400	500
САП-1	300	260	—	180	—	120	—	60
САП-2	350	—	—	210	—	130	—	85
САП-3	400	—	—	240	—	180	—	90
Алюминиевый сплав + 50% борного волокна	1200	1100	1050	1000	950	—	900	800
Алюминий + 40% углеродного волокна	1200	1180	1150	1100	1080	1050	1000	—
Алюминий + 40% бериллиевой проволоки	560	510	420	390	340	—	—	—
Алюминий + 50% кварцевого волокна (SiO_2)	840	820	780	—	730	—	470	390*
Магний + 25% борного волокна	920	—	900	—	770	—	730	650
Магний + 50% борного волокна	1200	—	—	—	—	—	—	800*

* При температуре 450 °С.

Таблица 3.40. **Механическне свойства магниевых сплавов при высоких температурах [3,24]**

Сплав, состояние	$\sigma_в$, МПа, при t, °С							$\sigma_{0,2}$, МПа, при t, °С							δ, %, при t, °С						
	20	100	150	200	250	300	350	20	100	150	200	250	300	350	20	100	150	200	250	300	350
МА2	270	210	165	115	75	—	—	170	115	—	—	—	—	—	10	30	45	60	75	—	—
МА2-1	300	225	190	130	90	70	—	200	115	95	75	45	40	—	14	19	30	35	45	50	—
МА5	310	220	170	125	85	70	—	220	130	100	70	55	35	—	11	22	30	38	45	85	—
МА8	240	180	150	130	110	70	—	150	100	70	60	50	—	—	15	26	30	32	34	62	—
МА11	280	—	—	210	180	140	100	145	—	—	110	90	80	60	10	—	—	13	15	19	45
МА14	330	260	210	150	105	70	—	255	—	—	—	—	—	—	10	20	28	50	58	62	—

Сплав, состояние	$\sigma_в$, МПа, при t, °С							$\sigma_{0,2}$, МПа, при t, °С							δ, %, при t, °С						
	20	100	150	200	250	300	350	20	100	150	200	250	300	350	20	100	150	200	250	300	350
ВМД1*	300	—	—	170	150	130	110	250	—	—	—	130	105	90	5	—	—	12	12	13	20
МЛ3	180	160	145	105	—	60	—	55	50	45	40	—	30	—	8	10	11	12	—	11	—
МЛ4Т4	250	240	210	150	75	—	—	85	80	75	68	—	—	—	9	7	15	25	26	—	—
МЛ5Т4	250	230	185	155	120	90	—	90	80	60	50	40	—	—	9	10	12	15	15	—	—
МЛ6Т6	260	230	210	150	110	80	—	140	—	85	—	70	—	—	1,5	5	8	15	—	—	—
МЛ9Т6	250	—	—	210	170	120	—	145	—	—	135	120	105	60	6	—	—	5	10	20	25
МЛ10Т6	240	—	—	190	165	135	—	150	—	—	140	130	110	2	5	—	—	8	13	17	—
МЛ11Т6	160	—	—	140	130	105	75	100	—	—	80	75	60	45	3	—	—	6	8,5	30	30
МЛ12Т6	250	—	160	125	85	55	—	150	—	100	75	50	30	—	6	—	8	10	12	15	—
МЛ15Т1	220	—	150	125	100	75	—	140	—	105	85	65	50	—	3,5	—	5	13	16	16	—
ВМЛ1Т6**	200	—	—	—	—	145	110	95	—	—	—	—	75	55	6	—	—	—	—	10	20

* При температуре 400 °С: $\sigma_в = 70$ МПа; $\delta = 24\%$.
** При температуре 400 °С: $\sigma_в = 65$ МПа; $\sigma_{0,2} = 35$ МПа; $\delta = 25\%$.

Таблица 3.41. **Прочность и пластичность жаропрочных сталей и сплавов при высоких температурах [3,24]**

Сталь, сплав	$\sigma_в$, МПа, при t, °С								δ, %, при t, °С						
	20	500	600	700	800	900	1000	1100	20	500	600	700	800	900	1000
Стали															
45Х14Н1УВ2М	720	630	540	340	220	—	—	—	20	18	20	32	40	—	—
40Х12Н8Г8МФБ	900	680	630	460	390	250	—	—	18	11	10	9	9	8	—
10Х12Н22Т3МР	1000	900	850	700	470	—	—	—	9	9	10	10	17	—	—
10ХН35ВТЮ	1300	1200	1110	1000	700	400*1	—	—	15	12	12	9	15	22*1	—
40Х12Н8Г8МФЛ	800	550	500	370	280	—	—	—	19	32	32	29	20	—	—
15Х12Н25Т3М3В4Л	900	—	800	—	500	—	—	—	12	—	5	—	5	—	—
Никелевые сплавы:															
ХН78Т	780	—	—	400	180	110	65	45	40	—	—	35	70	90	100
ХН60В*2	800	—	—	530	400	230	140	85	—	—	—	—	—	—	—
ХН77ТЮР	1000	—	950	840	560	400*1	—	—	24	—	24	22	15	18*1	—
ХН70ВМТЮ	1150	—	1000	900	740	500	—	—	20	—	17	10	9	15	—
ХН55ВМТФКЮ	1200	—	950	850	650	—	300	—	12	—	10	10	10	17	20
ХН62МВТЮ	1250	—	980	980	930	620	300	—	18	—	18	10	8	12	17
ВЛ7—45У	500	—	—	400	300	—	—	—	7	—	—	5,5	10	—	—
ЖС3	750	—	—	—	560	300	—	—	8,5	—	—	—	3	4	—
ЖС6	1050	—	—	—	850	780	480	—	1	—	—	—	0,5	2,5	6
ЖС6К	1000	—	—	—	920	780	530	—	2,5	—	—	—	2	2	4,5
ЭП23	1250	—	—	—	—	940	720	450	2	—	—	—	—	6	13
Кобальтовые сплавы:															
ЛК4	700	—	520	470	400	270	—	—	8	—	12	10	6,5	9	—
ЛК4Я	900	—	750	700	510	350	260*3	—	5,5	—	11	12,5	14	18	25*3
4К66Я	900	—	—	750	550	375	295*3	—	6	—	—	10,5	16	25	19*3

*1 При температуре 850 °С.
*2 $\sigma_в^{1200} = 43$ МПа.
*3 При температуре 950 °С.

Таблица 3.42. **Прочность при высоких температурах сплавов на основе тугоплавких металлов, керамики и композиционных материалов на никелевой матрице [3,14,24]**

Материал	$\sigma_в$, МПа, при t, °С										
	20	1000	1100	1200	1400	1500	1800	1900	2000	2200	2400
Ниобиевые сплавы											
ВН2	650	400	300	—	—	80	—	—	—	—	—
ВН3	780	—	450	270	—	125	—	—	—	—	—
ВН4	810	—	700	550	—	170	—	—	—	—	—
РН6	890	—	—	290	—	—	90	—	—	—	—

Продолжение табл. 3.42

Материал	$\sigma_в$, МПа, при t, °С										
	20	1000	1100	1200	1400	1500	1800	1900	2000	2200	2400
Молибденовые сплавы											
ВМ1	860	—	—	500	190	140	100	—	—	—	—
ВМ2	750	—	—	450	300	160	90	—	80	—	—
МР—47ВП	780	—	—	—	—	150	60	—	—	—	—
ЦМВ-30	—	—	—	—	—	160	63	—	—	—	—
Вольфрамовые сплавы (порошковые)											
Вольфрам	—	—	—	—	—	—	—	—	80	60	30*4
Вольфрам—50Mo	—	—	—	—	—	—	140*1	45	—	35	13
W—1ThO_2	—	—	—	—	—	—	260*1	190	—	90	—
W—2ThO_2	—	—	—	—	—	—	200*1	180	—	120	70
W—30Re, литой	2180	—	1195	—	—	—	210*1	140	—	—	—
Хромовые сплавы											
ВХ2	400	—	—	165*2	—	45	—	—	—	—	—
ВХ4	1080	210	—	100*2	—	—	—	—	—	—	—
Композиционные материалы											
Никель—2,5HfO_2	525	150	105	85	—	—	—	—	—	—	—
Никель—50 углеродного волокна	560	240	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ЖСК6—50 вольфрамовой проволоки	580	540	380	—	290*3	—	—	—	—	—	—
Керамика ($\sigma_в$ — при изгибе)											
30Cr—70Al_2O_3	390	230	—	—	175*3	—	—	—	—	—	—
Из оксида Al_2O_3	150	95	—	76	60	36	—	—	—	—	—
Твердый сплав	1500	—	—	800	—	—	—	—	—	—	—

*1 При температуре 1650 °С.
*2 При 1150 °С.
*3 При 1300 °С.
*4 При 2500 °С.

Таблица 3.43. **Длительная прочность и ползучесть сталей и титановых сплавов [3,10,24]**

Сталь, сплав	σ_{100}, МПа, при t, °С							$\sigma_{0,2/100}$, МПа, при t, °С					
	300	350	400	450	500	550	600	300	350	400	450	500	550
Стали													
30ХМ	—	—	740*1	580*1	380*1	260*1	—	—	—	—	—	142*2	59*2
30Х2Н2ВФА	980	—	800	750	540	320	—	—	—	640	440	370	240
30ХГСА	—	—	600*1	460*1	260*1	120*1	—	—	—	160*1	110*1	55*1	22*1
08Х15Н9Ю	1050	—	850	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
08Х17Н5М3	—	—	—	950	650	400	—	—	—	—	—	—	—
10Х12Н2ВМФ	—	—	—	730	—	440	270	—	—	—	580	—	200
23Х13НВМФА	—	—	1400	1000	700	—	—	—	—	870	620	210	—
13Х14НВФРА	950	—	—	720	—	300	—	760	—	—	380	—	180
10Х13Н3ВФЛ	—	—	—	—	450	300	220	—	—	460	310	215	180
Титановые сплавы													
ВТ5-1	—	450	—	—	—	—	—	400	330	—	—	—	—
0Т4	—	480	390	—	—	—	—	—	300	190	50	—	—
ВТ6С	—	500	—	—	140	—	—	—	320	—	—	—	—
ВТ6	—	—	580	—	380	—	—	—	—	360	140	60	—
ВТ3-1	—	—	650	550	360	—	—	—	—	300	160	50	—
ВТ8	—	—	750	650	450	380	—	—	—	370	230	120	—
ВТ9	—	—	—	—	650	450	230	—	—	—	—	280	120
ВТ14	—	—	680	540	—	—	—	—	530	350	—	—	—
ВТ5Л	400	—	350	—	—	—	—	—	—	280	—	170	—
ВТ6Л	—	—	530	—	470	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ9Л	650	—	620	—	500	350	—	500	—	460	—	280	200
ВТ20Л	—	600	—	—	430	—	—	—	450	—	—	160	—
ВТ21Л	—	—	600	—	440	—	—	—	—	430	—	180	—

*1 За 200 ч.
*2 За 10 000 ч.

Таблица 3.44. **Длительная прочность и ползучесть алюминиевых деформируемых сплавов [3,5,24]**

Сплав, состояние, полуфабрикат	σ_{100}, МПа, при t, °С						$\sigma_{0.2/100}$, МПа, при t, °С					
	125	150	175	200	250	300	125	150	175	200	250	300
Д16Т, Д16Т1, лист	340	300	230	180	—	—	180	180	120	85	—	—
Д16чТ, 1163Т, плита	345	315	270	—	—	—	300	270	235	—	—	—
Д16чТ, 1163Т, прессованный профиль	340	320	270	210	—	—	—	260	210	—	—	—
ВД17Т1, прессованная полоса	—	—	—	190	100	55	—	—	—	160	75	35
АК4-1Т1, лист	280	250	210	170	—	—	250	220	145	90	—	—
АКА-1Т1, плита	350	330	240	—	—	—	280	250	160	—	—	—
1201Т1, поковка, прессованный профиль, плита	290	250	220	180	—	—	240	200	140	130	—	—
Д20Т2, прессованная полоса	—	300	210	180	125	80	—	200	170	120	80	65
Д21Т1, лист	370	330	240	170	—	—	290	250	170	105	—	—
Д21Т1, плита	370	330	260	200	120	—	310	280	220	160	95	—
В95Т1, лист	—	230	—	100	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 3.45. **Длительная прочность жаропрочных сталей и сплавов [3,24]**

Сталь, сплав	σ_{100}, МПа, при t, °С					
	600	700	800	900	950	1000
Стали						
45Х14Н14В2М	300	180	80	—	—	—
38Х12Н8Г8МФБ	450	250	150	—	—	—
10Х12Н20Т3Р	580	390	280*	—	—	—
10Х14Н35М3ТЮ	700	450	250	—	—	—
15Х10Н22ВМТЛ	—	400	200	—	—	—
30Х12Н10Г8ВФЛ	400	280	140	—	—	—
Никелевые сплавы						
ХН77ТЮ	580	400	150			
ХН35ВТЮ	670	390	230	—	—	—
ХН77ТЮР	680	420	200	—	—	—
ХН70ВМТЮ	—	500	290	190**	—	—
ХН55ВМТФКЮ	—	700	440	200	—	80
ХН62МВКЮ	—	750	450	200	120	—
ХН78Т	—	105	45	15	—	—
ХН75МБТЮ	—	165	80	29	—	—
ЖС3	—	—	300	100	—	—
ЖС6	—	—	500	280	—	140
ЖС6К	—	—	520	320	—	155
Кобальтовые сплавы						
ЛК4	300	250	150	70	50	—
ЛК4Я	—	300	180	140	110	—
4К66Я	—	—	250	150	120	—

* При температуре 750°С.
** При 850°С.

Таблица 3.46. **Длительная прочность сплавов на основе тугоплавких металлов и композиционных материалов на никелевой матрице [3,14,24]**

Материал	σ_{100}, МПа, при t, °С				
	1100	1200	1300	1400	1500
Ниобиевые сплавы					
ВН2	90	—	—	—	—
ВН3	160	—	—	—	—
ВН4	280	—	—	—	—
ВН5А	140	—	—	—	—
РН6	—	110	—	—	—
МН1	250	110	—	—	—
МН2	360	260	—	—	—
Молибденовые сплавы					
ЦМ2А	—	90	65	40	—
ВМ1	—	90	—	—	—
ВМ2	—	155	—	50	—
ЦМ6	—	130	40	—	—
ЦМВ-30	—	250	—	—	5*
Хромовые сплавы					
ВХ1, ВХ2	—	45**	—	—	—
ВХ3	—	150**	—	—	—
Вольфрамовые сплавы					
Вольфрам технический	—	—	—	70	60
Композиционные материалы					
ЖС6—50% вольфрамовой проволоки	150	80	—	—	—
Никель — 2,5% ThO_2	105	80	—	—	—
Никель — 2,5% HfO_2	70	50	—	—	—

* При температуре 1800 °С.
** При 1150 °С.

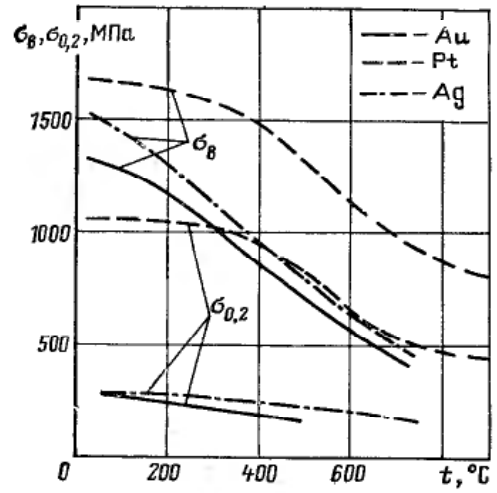


Рис. 3.8. Пределы прочности и текучести золота, платины и серебра при высоких температурах [3, 6, 8]

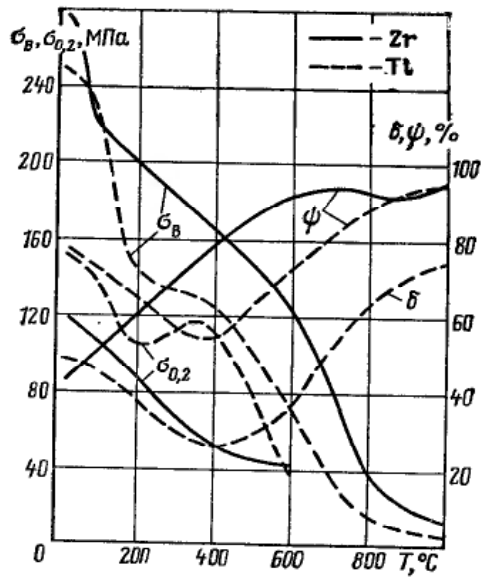


Рис. 3.10. Механические свойства сверхчистых циркония и титана при высоких температурах [6]

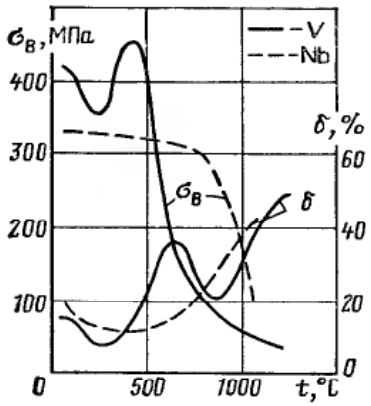


Рис. 3.12. Механические свойства ванадия и ниобия при высоких температурах [3, 6]

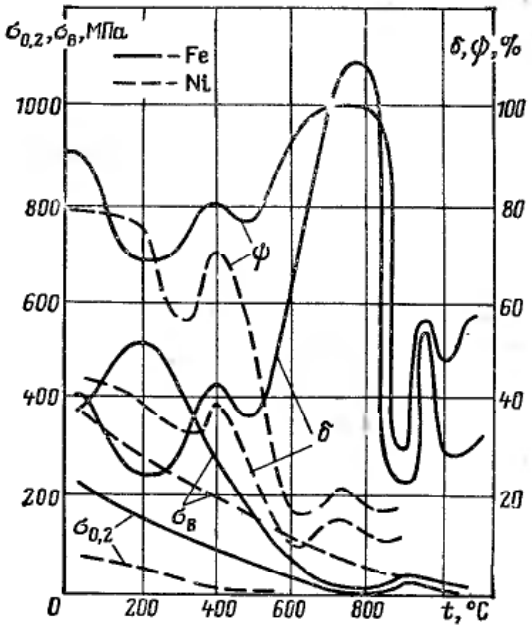


Рис. 3.9. Механические свойства железа и никеля при высоких температурах [6, 10]

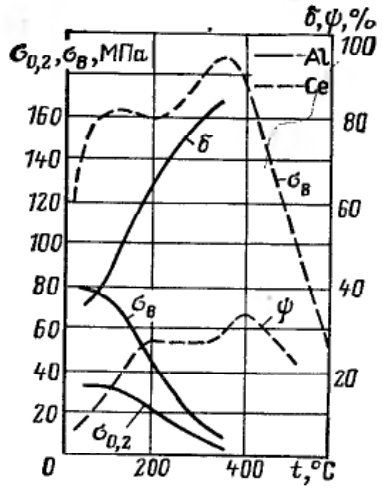


Рис. 3.11. Механические свойства алюминия и церия при высоких температурах [4, 6, 18]

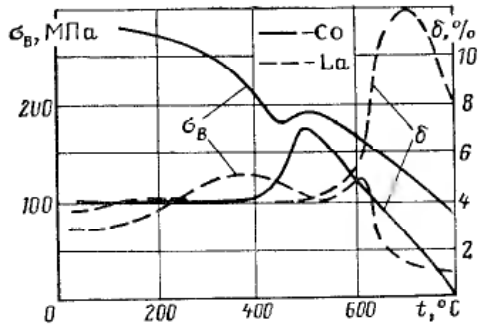


Рис. 3.13. Механические свойства лантана и кобальта при высоких температурах [3, 6]

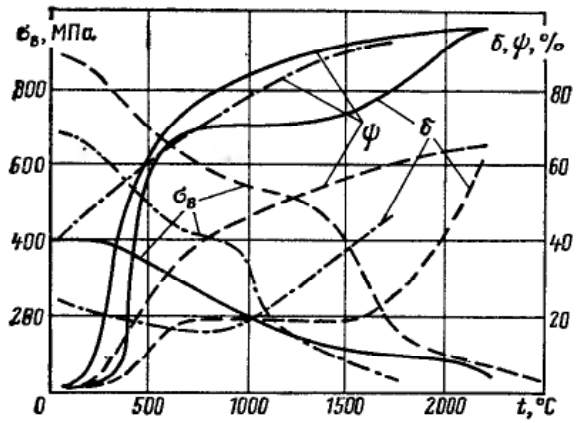


Рис. 3.14. Механические свойства вольфрама и молибдена при высоких температурах [3, 6]:
———— — вольфрам после отжига; — — — — вольфрам нагартованный; — · — · — · — молибден после отжига

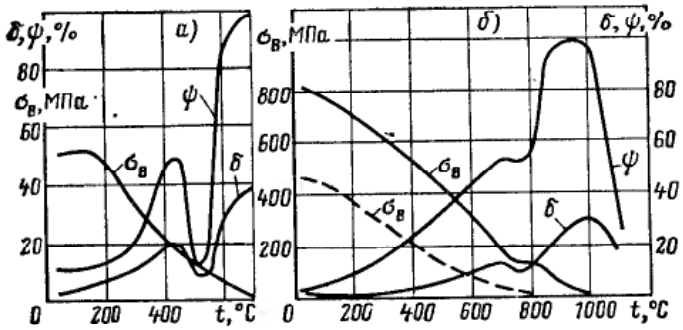


Рис. 3.15. Механические свойства стронция, урана и бериллия при высоких температурах [6]:
а — стронций литой; *б* — уран; — — — — бериллий

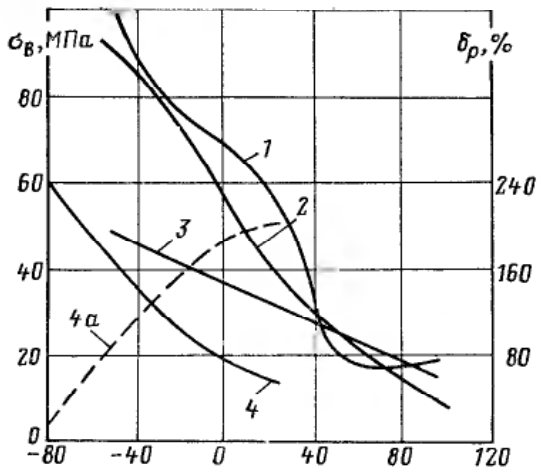


Рис. 3.16. Зависимость прочности некоторых неметаллических материалов от температуры испытания [24]:
1 — капрон (при изгибе); *2* — ПТХЭ (фторопласт-3) при изгибе; *3* — полиэтилен; *4* — морозостойкая резина; *4а* — удлинение при разрыве морозостойкой резины

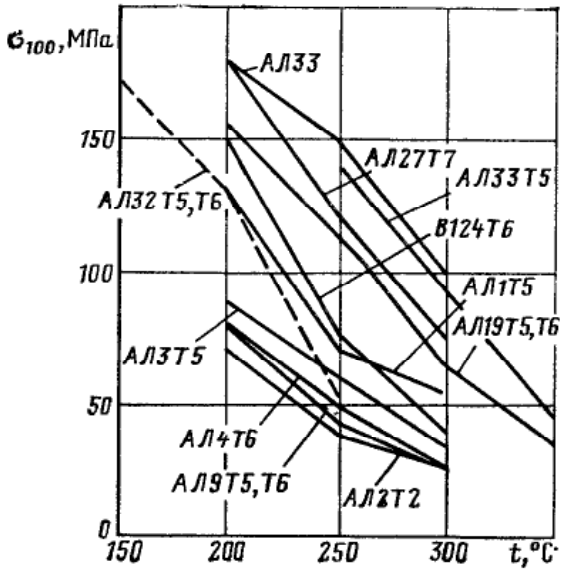


Рис. 3.17. Пределы длительной прочности алюминиевых литейных сплавов [3, 5]

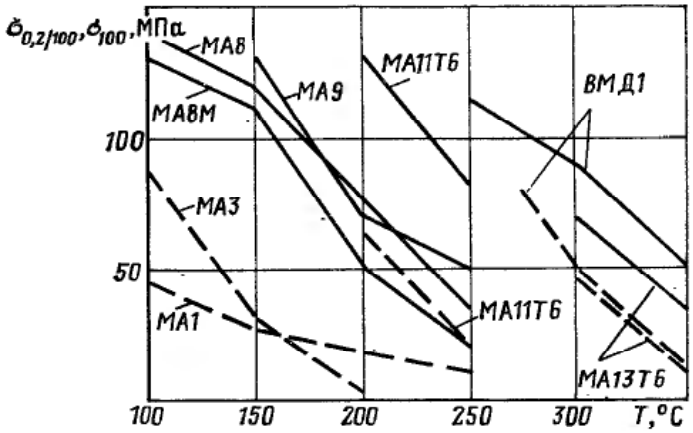


Рис. 3.18. Пределы длительной прочности (————) и ползучести (— — —) магниевых деформируемых сплавов [3]

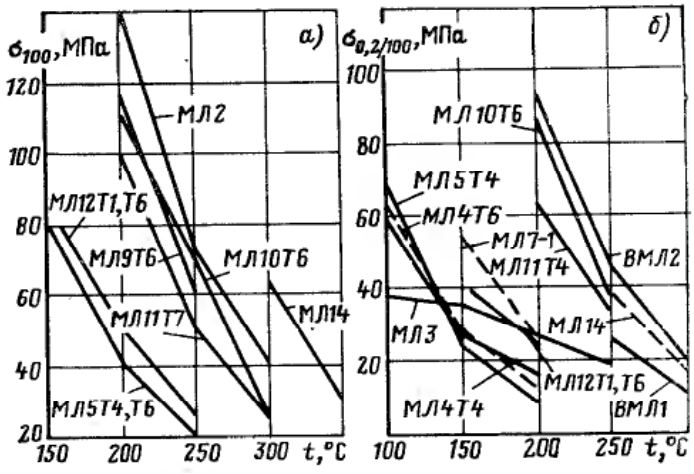


Рис. 3.19. Пределы длительной прочности (*а*) и ползучести (*б*) магниевых литейных сплавов [3]

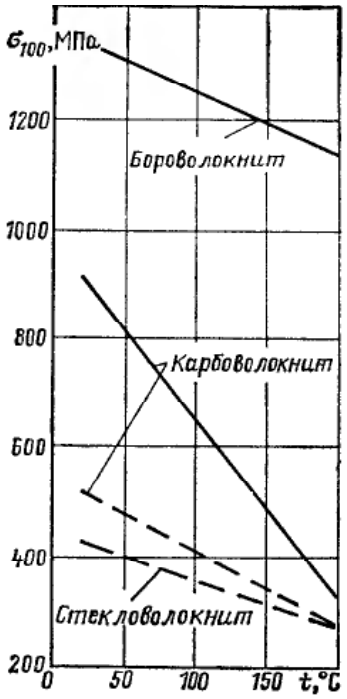


Рис. 3.20. Пределы длительной прочности композиционных материалов на полимерной матрице [13] при растяжении (———) и изгибе (— — —)

Рис. 3.21. Пределы ползучести жаропрочных сталей и никелевых сплавов [3]

3.4. ВЫНОСЛИВОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Методы определения характеристик выносливости при многоцикловой и малоцикловой усталости регламентируются в ГОСТ 25.502—79. Малоцикловая усталость характеризуется базой испытаний $N \leqslant 5 \cdot 10^4$ циклов и пониженной частотой нагружения $f = 0{,}1 \div 5$ Гц, а многоцикловая усталость — $N \geqslant 10^7$, $f = 20 \div 50$ Гц. Повреждение или разрушение в многоцикловой области происходит в основном при упругом, а в малоцикловой — при упругопластическом деформировании.

Таблица 3.47. **Пределы выносливости сталей при знакопеременном изгибе**

Сталь, сплав	$\sigma_в$, МПа	σ_{-1}, МПа	$\sigma^н_{-1}$, МПа ($\bar{K}_t = 2{,}2$)
Стали, $N = 10^7$ циклов [3, 20, 24]			
20	400	210	—
35	600	330	—
45	950	530	280
30ХМА	950	420	260
30ХМА	1600	620	—
30ХГСА	900	480	220
20Х3МВФ	920	530	200
12Х2НВФА	960	520	310
38ХА	1050	500	330
30Х3ВА	1050	610	350
30Х2Н2ВФА	1180	560	360
37ХН3А	1250	560	310
40ХН2МА	1300	580	—
40ХН2МА	1600	660	370
23Х2НВФА	1350	645	380
25Х2ГНТА	1500	610	360
25Х2ГНТА	1600	700	440
30ХГСНА	1650	700	490
30ХГСНА	1750	730	—
40ХН2СМА	1800	700	—
40ХН2СМА	2000	830	550
12Х18Н9Т	580	285	245
20Х13	950	480	240
09Х15Н8Ю	1350	620	—
13Х12Н2ВМФА	1200	600	400
23Х13НВМФА	1600	600	450
12Х13Н3ВФЛ	900	420	280
10Х17Н3СЛ	1000	410	260
Титановые сплавы [3, 10, 24], $N = 2 \cdot 10^7$ *циклов*			
ВТ1-0, лист	415	185	—
ВТ1-1, »	450	230	—
0Т4-1, »	650	340	—
0Т4, »	750	380	—
ВТ5-1, 0Т4, лист	750	400	—
ВТ5, пруток	850	450	310
ВТ6С, лист	950	500*	420*
ВТ6, пруток	1100	550*	300*
ВТ20, лист	950	420	—
ВТ14, »	900	400	—
ВТ14, »	1200	420	—
ВТ3-1, пруток	1000	480	—
ВТ3-1, »	1100	560*	390*
ВТ3-1, »	1200	620*	—
ВТ22, »	1100	530	330
ВТ8, »	1050	500	—
ВТ9, »	1150	540	—
ВТ5Л	800	280	250
ВТ14Л	950	270	230
ВТ6Л	850	200	—
ВТ9Л	1000	180	180
ВТ3-1Л	1000	220	220

* База испытаний $N = 10^7$ циклов.

Таблица 3.48. **Пределы выносливости алюминиевых сплавов при знакопеременном изгибе на базе $2 \cdot 10^7$ циклов [3, 5, 20]**

Сплав, состояние, полуфабрикат	$\sigma_в$, МПа	σ_{-1}, МПа	$\sigma^{и}_{-1}$, МПа ($K_t = 2{,}2$)
АД1М, лист	80	35*	—
АД1Н, »	150	50	—
АМг3М, »	230	80	—
АМг5М, »	300	110	—
АМг6М, лист, прессованный профиль	340	100	—
АД31Т1, прессованный профиль	250	90	50
АД33Т1, то же	320	110	60
АД35Т1, »	330	110	—
АВТ1, »	350	115	65
Д1Т, Д1чТ, штамповка	410	140	—
Д16чТ, плита, профиль	440	140	80
Д16чТ1, лист	470	120	—
Д16чТ1, прессованная панель	480	140	—
Д19Т, Д19чТ, прессованный профиль	480	160	—
ВАД1Т, лист	440	120	—
Д20Т1, лист, прессованный профиль	420	130	70
Д21Т1, поковка, штамповка	430	110	—
АК4-1Т1, плита, прессованный профиль	420	120	80
АК6Т1, штамповка	420	130	80
АК8Т1, прессованный профиль	480	135	85
ВД17Т1, прессованная полоса	520	155	90
В92Т1, прессованный пруток	450	150	—
В95пчТ1, лист, плита	570	160	90
В95пчТ1, прессованная панель	600	180	—
В95пчТ2, лист, плита, поковка, прессованная панель	540	160	—
В95пчТ3, прессованная панель	500	160	—
В95пчТ3, поковка	510	140	—
В93пчТ1, поковка	520	140	80
В93пчТ2, »	470	140	—
В93пчТ3, »	440	130	—
В96Ц3Т1, штамповка	630	170	—
САП1, прессованная полоса	300	80	60
САП2, прессованный профиль	350	90	60
САП3, прессованный пруток	400	115	75
САС1-400	270	80	—
САС1-50	340	90	—
АЛ1Т5	260	56*	—
АЛ4Т6	260	70	—
АЛ4МТ5	350	90**	—
АЛ5Т5	260	65*	—
АЛ8Т4	300	50*	—
АЛ9Т5	210	45*	—
АЛ9-1Т5***	270	80	—
АЛ19Т5	360	70	—
АЛ19Т5***	400	90	—
АЛ20Т2, АЛ21Т2	210	70	—
АЛ20Т7, АЛ21Т7	240	75	—
АЛ23-1Т4	230	40	—
АЛ27Т4	360	60	—
АЛ27-1	390	80	50
АЛ27-1Т4	380	70	—
АЛ33Т5	280	75	—
ВАЛ8Т5***	400	110	—

* База испытаний $N = 5 \cdot 10^8$ циклов.
** База испытаний $N = 10^7$ циклов.
*** Литье в кокиль, остальные — в землю.

Характеристики выносливости зависят от формы и размеров образца, а также способа и частоты нагружения. С понижением частоты нагружения и увеличением абсолютных размеров образца сопротивление усталости падает. Выносливость металлических материалов существенно зависит от состояния поверхности и определяется, как правило, на полированных образцах; пластмассы менее чувствительны к чистоте поверхности.

Бо́льшая часть данных по многоцикловой усталости получена при испытаниях на изгиб симметричным циклом с определением σ_{-1}. Для ориентировочной оценки пределов выносливости при других видах напряженного состояния можно использовать следующие соотношения: для конструкционных сталей предел выносливости при растяжении — сжатии $\sigma^{р}_{-1} = (0{,}8 \div 0{,}9)\sigma_{-1}$, при кручении $\tau_{-1} = (0{,}5 \div 0{,}6)\sigma_{-1}$; для алюминиевых сплавов эти коэффициенты составляют 0,85—0,95 и 0,55—0,65 соответственно.

Для некоторых групп материалов установлены зависимости между пределами выносливости и прочности. Отношение $\sigma_{-1}/\sigma_в$ для сталей составляет 0,35—0,55 при базе испытания $2 \cdot 10^7$ циклов, для титановых сплавов 0,45—0,55 при $N = 2 \cdot 10^7$ циклов; при этом более высокопрочным материалам отвечают меньшие значения $\sigma_{-1}/\sigma_в$. Для неметаллических материалов (текстолиты, органические стекла и др.) $\sigma_{-1} = (0{,}2 \div 0{,}3)\,\sigma_в$ ($N = 10^7$ циклов).

Таблица 3.49. **Пределы выносливости магниевых сплавов при знакоперемением изгибе на базе $2 \cdot 10^7$ циклов [3]**

Сплав, состояние, полуфабрикат	$\sigma_в$, МПа	σ_{-1}, МПа	$\sigma^{и}_{-1}$, МПа ($K_t = 2{,}2$)
МА2-1, плита	270	105*	70*
МА3, полоса	280	115	—
МА5Т4, пруток	320	130	100
МА14-Т1, полоса	340	120	80
МА10Т6, пруток	430	125	80
МА11Т6, »	280	85	50
МА13Т8, лист	240	70	—
ВМД1, пруток	280	70	50
МА1М, »	240	75	—
МА2, »	270	100*	—
МА8, полоса	260	80	—
МЛ4	170	80	65
МЛ4Т4	235	90	80
МЛ4Т6	240	80	70
МЛ5, МЛ6	150	85	70
МЛ5Т4	240	100	80
МЛ5Т6. МЛ6Т6	240	85	70
МЛ6Т4	235	95	75
МЛ12	210	50	50
МЛ12Т1	230	75	70
МЛ12Т6	250	80	—
МЛ15Т1	215	90	70
МЛ9Т6	240	80	—
МЛ10Т6	240	70	—
МЛ11Т4, Т6	155	70	—
МЛ14	200	50	—
ВМЛ2	260	60	—
МЛ3, МЛ7-1	180	55	—

* База испытаний $N = 5 \cdot 10^7$.

Таблица 3.50. Влияние температуры на пределы выносливости жаропрочных сталей и никелевых сплавов при знакопеременном изгибе на базе $2 \cdot 10^7$ циклов [3]

Сплав	$\sigma_в$, МПа	σ_{-1}, МПа, при t, °С					$\sigma^н_{-1}$ ($K_t = 2{,}2$), МПа, при t, °С			
		20	600	700	800	900	600	700	800	900
10Х12Н20Т3Р	900	—	330	280	—	—	—	—	—	—
10Х13Н35М3ТЮ	1000	—	—	300	260	—	—	—	—	—
08Х35ВТ10	1150	—	—	300*	230	—	—	—	—	—
ХН77ТЮ	1000	360	390	360	300	—	—	—	—	—
ХН77ТЮР	1000	370	360	390	300	—	240	250	230	—
ХН55ВМТФКЮ	1100	—	—	350	360	300	—	270	270	270
ХН62МВКЮ	1180	—	—	300	305	300	—	255	255	255
ХН70ВМТЮ	1150	—	350	370	365	250	—	290	270	190
ЖС3	750	—	—	—	300	—	—	—	—	—
ЖС6**	1040	270	—	—	270	260	—	—	—	—
ЖС6К**	1000	280	—	—	280	290	—	—	—	—
ВЛ7-45У	500	260	—	—	160	—	—	—	—	—

* При температуре 750 °С.
** При 1000 °С ($\sigma_{-1} = 220$ МПа)

Композиционные волокнистые материалы отличаются повышенным отношением $\sigma_{-1}/\sigma_в = 0{,}6 \div 0{,}8$ ($N = 10^7$ циклов).

В табл. 3.47—3.53 и на рис. 3.22—3.24 представлены следующие характеристики выносливости:

σ_{-1} — предел выносливости при симметричном изгибе — наибольшее напряжение цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого числа циклов или при заданной базе испытаний ($10^7 \div 2 \cdot 10^7$ циклов);

$\sigma^н_{-1}$ — предел выносливости образца с надрезом или отверстием при $K_t = 2{,}2 \div 2{,}6$, где K_t — теоретический коэффициент концентрации напряжений;

σ_{max} — предел выносливости (малоцикловой усталости) при асимметричном растяжении гладкого ($K_t = 1$) или надрезанного ($K_t = 2{,}2 \div 2{,}6$) образца — наибольшее напряжение цикла, при котором не происходит разрушения при заданной базе испытания;

N — долговечность — число циклов, выдерживаемых образцом перед разрушением при заданном напряжении, база испытаний.

Таблица 3.51. Значения пределов выносливости композиционных материалов и пластмасс при знакопеременном изгибе на базе 10^7 циклов [3,12,14,24]

Материал	$\sigma_в$, МПа	σ_{-1}, МПа	Материал	$\sigma_в$, МПа	σ_{-1}, МПа
Бороалюминий	1250	650	Бороволокнит	1300	420
	1150	600	Карбоволокнит	1020	500
	1100	550		650	300
Боромагний	1200	550			
Углеалюминий	1200	400	Стекловолокнит	350	90
	650	170	Оргстекло	62,5	17—30

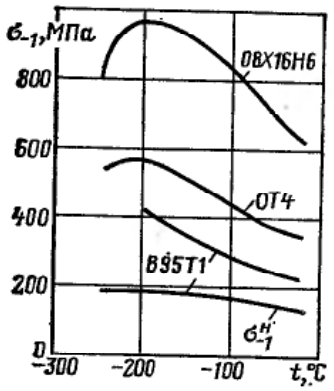


Рис. 3.22. Влияние низких температур на предел выносливости (база 10^6 циклов) некоторых сплавов [3]

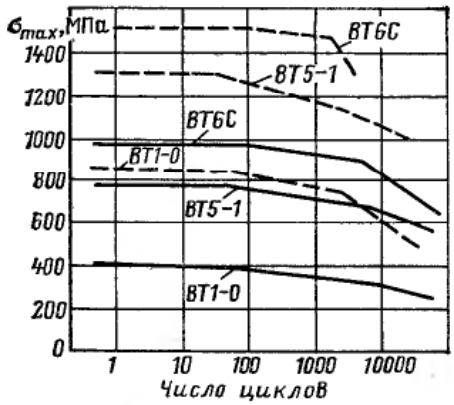


Рис. 3.23. Кривые малоцикловой усталости титановых сплавов [10] при температуре 20 (————) и 196°С (— — —)

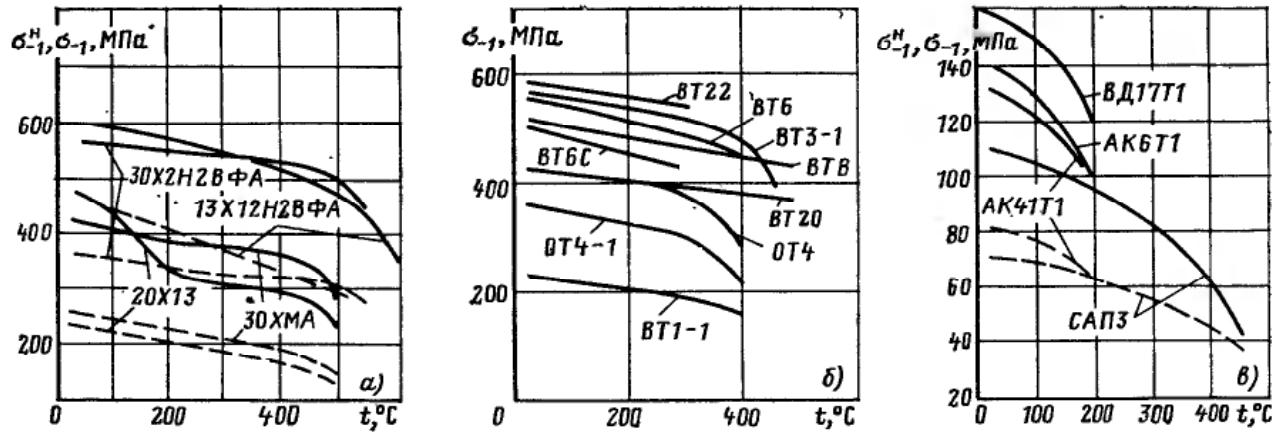


Рис. 3.24. Влияние высоких температур на предел выносливости сталей (*а*) [3, 31], титановых сплавов (*б*) [3, 10, 24], алюминиевых сплавов (*в*)[31, 5, 3]: —— σ_{-1}; — — — σ^N_{-1}

Таблица 3.52. **Малоцикловая усталость при асимметричном растижении*** [3,5,10,20,24,27,30,31]

Сталь, сплав, полуфабрикат	$\sigma_в$, МПа	K_t	База испытаний N, 10^3 циклов	σ_{max}, МПа
30ХГСА, пруток	1000	1	50	650
То же	1000	1	20	800
»	1000	2,6	20	400
30ХГСНА, пруток	1600	2,6	100	400
То же	1750	1	50	900
»	1750	1,6	50	650
»	1750	2,2	50	500
»	1750	4	50	250
03Х18К8М5Т, поковка	1700	2,6	100	450
ВТ1-0, лист	400	2,6	20	300
ВТ5-1, »	800	2,6	20	600
ВТ6С, »	980	2,6	20	750
ВТ22, поковка	1100	2,6	100	350
ВТ23. плита	1100	2,6	100	330
ВТ5, пруток	950	2,2	20	630
Д16Т, лист	480	1	50	280
То же	480	1	20	400
»	480	2,5	20	280
»	480	2,6	20	250
»	480	2,6	50	180
Д16Т1, лист	480	2,6	50	160
Д19Т, »	470	2,6	50	180
В95Т1, »	500	1	20	320
То же	500	2,5	20	260
В95пчТ2, лист, плита	530	2,6	50	160
Д16чТ, плита	470	2,6	50	200
То же	470	2,6	100	190
АК4-1Т2, плита	430	2,6	50	185
1201Т1, »	465	2,6	50	180
В93пчТ1, Т2, Т3, штамповка	420—500	2,6	50	150
В95очТ2, поковка	540	2,6	50	190
Д16Т, пруток	480	2,2	20	430
В95Т1, »	650	2,2	20	400
В95пчТ1, Т2, Т3, панель	480—565	2,6	50	180
Д16чТ, прессованный полуфабрикат	440	2,6	20	250
В95Т1, то же	600	2,6	20	200
ВАЛ8Т5, отливка	400	1	50	200
То же	400	2,2	50	180
Бороалюминий, лист	1250	1	800	950
Боромагний, »	1200	1	800	800

* $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0 \div 0{,}1$.

Таблица 3.53. **Влияние температуры испытания на сопротивление малоцикловой усталости полосы с отверстием ($K_t = 2{,}5$) при асимметричном растяжении*** [3,20]

Сплав, состояние, полуфабрикат	$\sigma_в$, МПа	База испытаний N, 10^2 циклов	t, °С	σ_{max}, МПа
Д16Т, лист	470	20	20	260
			200	220
В95Т1, »	550	20	20	220
			200	180
АК4-1Т1, плита	430	50	20	190
			150	170
ВТ1-1, пруток	700	20	20	390
			300	210

* $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0$.

3.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Основными характеристиками разрушения являются вязкость разрушения или критический коэффициент интенсивности напряжений и скорость роста трещины усталости. Характеристики разрушения при однократном нагружении определяют на образцах с заранее выращенными усталостными трещинами. Коэффициент интенсивности напряжений K характеризует концентрацию напряжений в вершине трещины; в общем виде $K = \sigma\sqrt{\pi l}\,y$, где σ — напряжение в сечении брутто; l — половина длины трещины; y — функция, зависящая от геометрии образца и трещины. Критический коэффициент интенсивности напряжений определяют по моменту, при котором наступает нестабильный рост трещины.

Вязкость разрушения при плоской деформации K_{1C} оценивают по результатам испытания внецентренным растяжением компактных образцов, толщина которых $t = 2{,}5\,(K_{1C}/\sigma_{0,2})^2$ обеспечивает наиболее стесненные условия для пластической деформации перед фронтом трещины.

Таблица 3.54. **Вязкость разрушения при плоской деформации**

Материал, состояние, полуфабрикат	Направление вырезки образца*	$\sigma_{0,2}$, МПа	K_{1C}, МПа·м$^{1/2}$
Стали [25—27]			
20, нормализация	ДП	400	140
15Х2НМФА, нормализация	ДП	640	148
40Х, закалка и отпуск	ДП	1250	115
40ХНМ, то же	ДП	1500	80
30ХГСНА, изотермическая закалка	ДП	1550	85
03Н18К8М5Т, закалка и старение	ДП	1550	130
03Н18К9М5Т, то же	ДП	1700	100
То же	ДП	1800	75
»	ДП	2000	70
Титановые сплавы [21,26,28]			
ОТ4, отжиг, штамповка	ДП	700	105
ВТ5-1, отжиг, пруток	ДП	750	98
ВТ20, отжиг, поковка	ДП	760	104
ВТ6ч, отжиг, плита	ДП	820	85
ВТ3-1, отжиг, поковка	ДП	950	76
ВТ3-1, закалка и старение, штамповка	ПД	1200	58
ВТ9, то же	ДП	1050	78
То же	ДП	1150	58
ВТ22, отжиг, штамповка	ДП	1080	73
ВТ22, отжиг, плита	ДП	1050	79
ВТ22, закалка и старение, пруток	ДП	1250	54
ВТ23, старение, плита	ПД	1080	73
ВТ9Л, закалка и старение	—	1000	78
ВТ20Л, отжиг	—	800	81
Алюминиевые сплавы [5,20,22,28]			
Д16Т, поковка	ПД	290	35
», плита	ПД	340	27
», прессованная полоса	ДП	340	37
Д16чТ, поковка	ДП	290	38
Д16Т1, прессованная полоса	ДП	345	31
Д16чТ1, поковка	ПД	375	24
Д16чТ1, штамповка	ДП	465	31
Д16чТ1, плита	ДП	400	38
То же	ДП	450	30
»	ПД	460	26
Д16очТ1, плита	ПД	430	30
1201Т1 »	ДП	350	35
То же	ПД	345	34
»	ВД	350	25
АК4-1Т1, »	ДП	330	31
То же	ДП	400	24
»	ПД	360	22
АК4-1Т1, штамповка	ДП	400	25
АК6Т1, поковка	ДП	320	37
АК8Т1, поковка, штамповка	ДП	420	29
В95Т1, плита	ДП	485	33
То же	ПД	475	28
В95очТ1, плита	ПД	490	32
В95пчТ2, »	ДП	460	36
	ПД	455	29

* Первая буква обозначает направление оси образца относительно волокна, вторая — направление плоскости развития трещины.

Продолжение табл. 3.54

Материал, состояние, полуфабрикат	Направление вырезки образца*	$\sigma_{0,2}$, МПа	K_{1C}, МПа·м$^{1/2}$
В95пчТ3, плита	ДП	440	37
	ПД	435	30
В93пчТ1, штамповка	ДП	480	29
В93пчТ2, »	ДП	440	33
В93пчТ3, »	ДП	360	35
В96Ц3Т3, »	ДП	460	30
В96ЦТ1, »	ДП	560	22
Композиционные материалы однонаправленной структуры на полимерной матрице [12]			
Эпоксиуглеволокнит	ДП	1050	2,45
Эпоксибороволокнит	ДП	1200	2,7
Эпоксистекловолокнит	ДП	1800	2,9

Таблица 3.55. **Вязкость разрушения при плоском напряженном состоянии алюминиевых и титановых сплавов***

Сплав, состояние, полуфабрикат	$\sigma_{0,2}$, МПа	B, м	K_C^y, МПа·м$^{1/2}$
Алюминиевые сплавы [5,20,22,28]			
АМг6Н, лист холоднокатаный	355	0,1	69
Д16Т, то же	330	0,1	60
То же	330	0,4	75
Д16Т, лист горячекатаный	350	0,1	70
То же	370	0,4	85
Д16Т1, лист холоднокатаный	420	0,1	55
Д16чТ, то же	300	0,2	65
Д16чТ, лист горячекатаный	300	0,2	80
То же	360	0,2	75
Д16чТ, плита	350	0,2	73
Д16чТ, панель прессованная	420	0,2	83
АК4-1Т1, плита	380	0,2	52
То же	400	0,2	45
1201Т1, лист холоднокатаный	380	0,2	50
1201Т1, лист горячекатаный	330	0,2	63
То же	330	0,3	75
»	330	0,4	82
1201Т1, плита	365	0,2	73
В95Т1, лист горячекатаный	480	0,1	52
То же	540	0,1	40
В95пчТ1, лист горячекатаный	530	0,1	60
В95пчТ2, лист холоднокатаный	475	0.2	60
В95пчТ2, лист горячекатаный	460	0,2	73
То же	480	0,1	63

* Образцы ДП.

Продолжение табл. 3.55

Сплав, состояние, полуфабрикат	$\sigma_{0,2}$, МПа	B, м	K_C^y, МПа·м$^{1/2}$
В95пчТ2, лист горячекатаный	480	0,2	80
В95пчТ2, плита	465	0,2	80
В95пчТ2, панель прессованная	480	0,2	85
Титановые сплавы [21,27,28]			
0Т4, лист, отжиг	660	0,1	140
ВТ5-1, то же	800	0,1	100
ВТ14, лист, отжиг	950	0,1	88
ВТ14, лист, закалка и старение	1175	0,1	62
ВТ20, лист, отжиг	950	0,1	115
ВТ6, лист, закалка и старение	1050	0,1	71—85

Таблица 3.56. **Влияние низких температур на вязкость разрушения при плоской деформации некоторых сталей и сплавов** [22, 25—27]

Сталь, сплав	$\sigma_{0,2}$, МПа	K_{1C}, МПа·м$^{1/2}$, при t, °С			
		20	—70	—130	—196
Сталь 20	285	—	—	47	22
25Г2НМ	350	175	50	40	—
15Х2НМФА	640	148	83	68	—
30ХГСНА	1550	85	45	—	—
03Х18К8Н5Т	1550	130	130	120	—
03Х18К9М5Т	1700	100	79	63	47
03Х18К9М5Т	2000	70	70	—	—
ВТ6ч, плита	820	85	—	—	60
Д16Т, прессованная полоса	340	37	—	—	55
Д16Т1, то же	350	31	—	—	35,5
1201Т1, плита*	350	35	—	—	35
АК4-1Т1, »	330	31	—	—	36
АК4-1Т1, »	405	27	—	—	30
В95Т1, »	495	28	—	—	29

* При температуре —253 °С K_{1C} =40 МПа·м$^{1/2}$.

Таблица 3.57. **Скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах** [5,20,27,27]*

Сплав, состояние, полуфабрикат	$\sigma_{0,2}$, МПа	$dl/dN\cdot10^6$, м/цикл, при ΔK, МПа·м$^{1/2}$			
		12,4	15,5	18,6	21,7
Д16Т, лист	325	0,37	0,6	1,0	—
Д16чТ, »	350	0,2	0,35	0,5	0,9
Д16Т1, »	470	0,35	0,55	1,0	1,7
Д16чТ1, »	480	0,35	0,5	0,9	1,5
Д19Т, »	345	0,3	0,5	0,65	1,3
Д19Т1, »	450	0,35	0,75	1,7	3

* Образец — пластина шириной 100—200 мм с центральной щелью, испытание при ассиметричном растяжении.

Продолжение табл. 3.57

Сплав, состояние, полуфабрикат	$\sigma_{0,2}$, МПа	$dl/dN\cdot10^6$, м/цикл, при ΔK, МПа·м$^{1/2}$			
		12,4	15,5	18,6	21,7
1911Т1, лист	355	0,4	0,8	1,5	2
В95Т1, »	500	0,5	0,8	1,3	1,6
В95пчТ1, »	530	0,3	0,65	1,0	1,2
В95пчТ2, »	480	0,4	0,7	0,9	—
АМг6М, »	170	1,5	2,5	—	—
АК4-1Т1, плита	450	0,4	0,75	1,5	2,2
1201Т1, »	345	0,3	0,5	1,1	1,4
В95пчТ1, »	500	0,65	1,25	1,95	—
В95пчТ2, »	460	0,5	0,8	1,15	—
Д16чТ, »	350	0,2	0,4	0,75	—
Д16чТ1, »	470	—	0,6	—	—
Д16чТ, штамповка	325	0,3	—	0,7	—
АК6Т1 »	350	0,4	—	0,85	—
В93пчТ2, Т3 »	360—440	0,25	—	0,55	—
Д16чТ, прессованная панель	400	0,2	0,4	0,45	0,6
Д19Т, то же	345	0,25	0,45	0,75	1,3
В95Т1, прессованная полоса	560	0,5	0,8	1,0	1,3
В95пчТ1, прессованная панель	560	0,4	0,65	1,05	—
В95пчТ2, то же	470	0,3	0,5	0,95	—
В95пчТ3, »	430	0,25	0,4	0,9	—

Таблица 3.58. **Скорость роста трещины усталости в титановых сплавах и сталях** [21,26,27,28]

Сплав, сталь, состояние, полуфабрикат	$\sigma_{0,2}$, МПа	dl/dN, 10^6, м/цикл, при ΔK, МПа·м$^{1/2}$				
		15,5	25,4	31	46,6	54,4
0Т4-1, отжиг, лист	570	—	—	0,45	1,05	1,8
0Т4, то же	660	—	—	0,7	2	—
ВТ20, »	950	—	—	0,5	1,2	1,8
ВТ23, закалка и старение, лист	1150	—	—	0,7	3	—
ВТ6ч, отжиг, плита*	850	0,16	0,5	1	1,9	2,6
ВТ6ч, закалка и старение, плита*	1000	0,15	0,6	0,9	1,1	2,3
ВТ22, отжиг, плита*	1100	0,15	0,4	0,9	1,8	—
ВТ23, старение, плита*	1100	0,15	0,5	0,8	1,5	—
ВТ23, закалка и старение, поковка*	1050	0,22	0,8	—	2	—
ВТ22, отжиг, штамповка	1000	—	—	—	—	2
ВТ23, отжиг, плита	1000	—	—	—	—	2,5
30ХГСНА, изотермическая закалка	1550	—	—	—	—	0,65
03Н18К8М5Т, закалка и старение	1550	—	—	—	—	0,55
Ст3	265	—	1,5	—	—	—
18Г	240	—	1,4	—	—	—
09Г2С	360	—	1,3	—	—	—

* Внецентренное растяжение компактных образцов.

Вязкость разрушения при плоском напряженном состоянии K_C^y определяется, как правило, при растяжении широких, относительно тонких пластин с центральной щелью (ширина $B=100\div400$ мм; $t=2\div15$ мм). Длина щели вместе с выращенными по ее концам трещинами составляет примерно 0,3 B. При определении K_C^y в расчет принимается начальный размер трещины (вместе со щелью).

Скорость роста трещины усталости определяют на пластинах с центральной щелью размером $2l=6\div10$ мм при циклическом растяжении. Графическое дифференцирование кривой «прирост трещины $\Delta\cdot2l$ — число циклов N» позволяет получить скорость роста трещины усталости dl/dN в зависимости от размаха коэффициента интенсивности напряжений $\Delta K=\Delta\sigma\sqrt{\pi l}\,y_s$, где $\Delta\sigma=\sigma_{max}\div\sigma_{min}$ — размах напряжений цикла.

Значения характеристик разрушения зависят от уровня прочности и структуры сплава, геометрии образца и трещины, а также условий нагружения. Представленные в табл. 3.54—3.58 данные получены на образцах со сквозной трещиной. Вязкость разрушения при плоском напряженном состоянии K_C^y существенно зависит от геометрии образца, в частности от ширины пластины. Ориентировочно значение величины K_C^y пропорционально $\sqrt{B}$ (B — ширина пластины), однако оно возрастает с увеличением ширины пластины не строго пропорционально $\sqrt{B}$, а в меньшей степени.

Для некоторых групп материалов установлены корреляционные связи между значениями вязкости разрушения при плоской деформации K_{1C} и удельной работы образца с трещиной КСТ при ударном и статическом изгибе [5, 21].

3.6. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В табл. 3.59—3.62 приведены: временное сопротивление разрыву $\sigma_{вр}$, предел текучести $\sigma_т$, твердость материала по Виккерсу HV, модуль Юнга E, модуль сдвига G, объемный модуль B, коэффициент Пуассона μ, температура кристаллизации при отжиге из аморфного состояния $T_к$. В примечании для некоторых сплавов указаны их общепринятые названия.

Модули упругости аморфных металлов связаны соотношениями

$$B=\frac{E}{3(1-2\mu)}=\frac{EG}{3(3G-E)}.$$

Данные в таблицах, если не оговорено особо, приведены для температуры 20 °С, для сравнения указаны механические свойства некоторых металлов в поликристаллическом или жидком состоянии.

Аморфные сплавы (АС) получают сверхскоростной закалкой из расплава со скоростью 10^5—10^7 К/с. АС можно рассматривать как идеальный упругопластичный материал с исчезающе малым деформационным упрочнением. В зависимости от температуры в АС наблюдаются два типа пластического течения. При температурах ниже $T_р=0{,}7\div0{,}8\ T_к$ имеет место высокая локальная пластичность при макроскопически хрупком характере разрушения. Скольжение происходит в локализованных полосах деформации (гетерогенная деформация). При температурах выше $T_р$ пластическая деформация однородна и осуществляется путем вязкого течения (гомогенная деформация).

Таблица 3.59. **Упругие свойства аморфных бинарных сплавов** [33—39, 41]

Материал (состав, %)	$\sigma_{вр}$, ГПа	$\sigma_т$, ГПа	HV, ГПа	E, ГПа	G, ГПа	B, ГПа	μ	$T_к$, К
$Mg_{70}Zn_{30}$	—	—	—	35	—	—	—	358,6
Mg (поликристаллический)	—	—	—	45	17,5	34	0,28	—
$Fe_{88}B_{12}$	—	—	—	137	—	—	—	—
$Fe_{80}B_{20}$*	—	3,63	10,8	168	64,9	141	0,3	—
$Fe_{75}B_{25}$	—	—	12,89	175,5	—	—	0,32	—
$Fe_{100-x}P_x$ ($14\leqslant x\leqslant21$)	—	—	—	120—130	—	—	—	—
Fe (поликристаллический)	—	—	—	211	82,4	—	0,28	—
Fe («усы»)	—	12	—	—	79,2	—	—	—
$Co_{75}B_{25}$	—	—	11,3	176,5	—	—	0,34	—
$Co_{85}P_{15}$	—	—	—	120	39	—	—	—
$Co_{17}Sm_2$	—	—	—	—	42,6	133	—	—
$Ni_{80}P_{20}$	—	—	—	103	36,7	161	0,394	
$Cu_{50}Ti_{50}$	—	—	—	96,7	—	—	—	—
$Cu_{60}Zr_{40}$	1,96	—	5,3	74,5	—	—	—	753
$Cu_{57}Zr_{43}$	1,96	—	5,3	74,5	—	—	—	—
$Cu_{50}Zr_{50}$	—	—	5,69	85,3	—	—	0,36	—
$Cu_{50}Ti_{50}$	—	—	5,98	96,7	—	—	0,36	—
Cu (поликристаллический)	—	—	—	123	45,5	136	0,35	—
$Pd_{80}Si_{20}$	1,33	0,86	3,19	66,7	35,5	182	0,416	653
Pd (поликристаллический)	—	—	—	123	44,1	139	0,30	—
$Pt_{75}P_{25}$	—	—	3,37	91,2	—	—	0,43	—

* Metglas 2605.

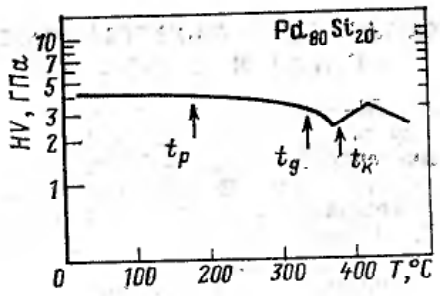


Рис. 3.25. Температурная зависимость твердости HV аморфного сплава $Pd_{80}Si_{20}$; t_g — температура стеклования, $t_к$ — температура кристаллизации [34]

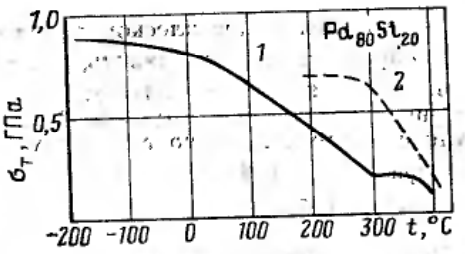


Рис. 3.26. Температурная зависимость предела текучести аморфной фазы $Pd_{80}Si_{20}$ (*1*) и кристаллической орторомбической фазы Pd_3Si (*2*) [36]

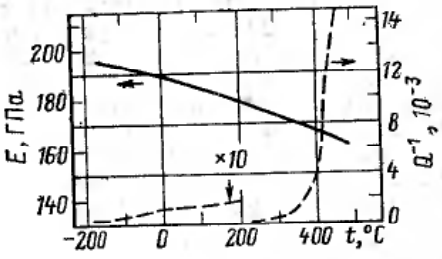


Рис. 3.27. Температурная зависимость модуля Юнга E и коэффициента поглощения ультразвука Q^{-1} для аморфного сплава $Co_{70,4}Fe_{4,6}Si_{15}B_{10}$. Измерения проводились при частоте звука 140 Гц. Экспоненциальный рост внутреннего трения (Q^{-1}) при приближении к температуре стеклования (здесь — около 500°С) характерен для всех аморфных материалов [33]

Таблица 3.60. **Упругие свойства аморфных многокомпонентных сплавов [33—42]**

Материал (состав, %)	$\sigma_{вр}$, ГПа	$\sigma_т$, ГПа	HV, ГПа	E, ГПа	G, ГПа	B, ГПа	μ	$T_к$, К	Примечание
$Ti_{50}Be_{40}Zr_{10}$	1,86	—	7,16	105	—	—	—	—	Metglas 2204
$Fe_{78}Si_{10}B_{12}$	3,33	—	8,92	125,5	—	—	—	773	Amomet 26
$Fe_{80}P_{13}C_7$	3,04	—	7,45	121,6	—	—	—	693	—
$Fe_{80}P_{14}C_4B_1$	—	2,44	8,19	135,3	—	—	—	—	Metglas 2615
$Fe_{60}Cr_6Mo_6B_{28}$	—	4,5	—	—	—	—	—	—	—
$Fe_{40}Co_{40}B_{20}$	—	—	—	174,2	65,0	184	0,34	—	—
$Fe_{60}Ni_{20}B_{20}$	—	—	—	166	61,0	206	0,365	—	—
$Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$	2,4	—	—	159,7	59,6	167	0,341	—	Vitrovac 0040
$Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$	1,72	2,4	6,3—7,4	126—144	—	—	—	—	Metglas 2826
$Fe_{22}Ni_{36}Cr_{14}P_{12}B_6$	1,91	—	7,35	144	—	—	—	—	Metglas 2826A
$Fe_{29}Ni_{49}P_{14}B_6Si_2$	—	2,38	7,77	132	48,0	169	0,37	—	Metglas 2826B
$Fe_{82}Zr_{12}B_6$	—	—	8,29	—	—	—	—	868	—
$Fe_{82}Nb_{12}B_6$	—	—	7,75	—	—	—	—	820	—
$Fe_{78}Mo_2B_{20}$	2,60	—	9,95	144	—	—	—	885	—
$Fe_{82}Hf_{12}B_6$	—	—	9,02	—	—	—	—	—	—
$Co_{75}Si_{15}B_{10}$	2,94	—	8,92	104	—	—	—	763	Amomet 27
$Co_{82}Ti_{12}B_6$	—	—	8,73	—	—	—	—	833	—
$Co_{74}Fe_6B_{20}$	—	—	—	175	66,7	132	0,32	—	—
$Co_{82}Zr_{12}B_6$	—	—	8,34	—	—	—	—	648	—
$Co_{82}Nb_{12}B_6$	—	—	6,77	—	—	—	—	705	—
$Co_{82}Hf_{12}B_6$	—	—	9,17	—	—	—	—	820	—
$Co_{82}Ta_{12}B_6$	—	—	7,50	—	—	—	—	723	—
$Ni_{75}Si_8B_{17}$	2,65	—	8,43	103	—	—	—	733	Amomet 28
$Ni_{78}Si_8B_{14}$	1,85	—	—	—	—	—	—	—	Vitrovac 0080
$Ni_{82}Zr_{12}B_6$	—	—	6,62	—	—	—	—	703	—
$Ni_{82}Hf_{12}B_6$	—	—	6,18	—	—	—	—	725	—
$Ni_{82}Ta_{12}B_6$	—	—	5,74	—	—	—	—	653	—
$Ni_{64}Pd_{16}P_{20}$	1,77	—	5,31	104	—	—	0,40	—	—
$Pd_{77,5}Cu_6Si_{16,5}$	—	1,47	4,46	82,5	34,8	182	—	—	—
$Pd_{64}Ni_{16}P_{20}$	1,57	—	4,43	92,2	—	—	0,41	—	—
$Pd_{40}Ni_{40}P_{20}$	—	—	—	98,1	—	—	—	—	—
$Pt_{60}Ni_{15}P_{25}$	—	—	—	96,1	33,8	202	0,421	—	—

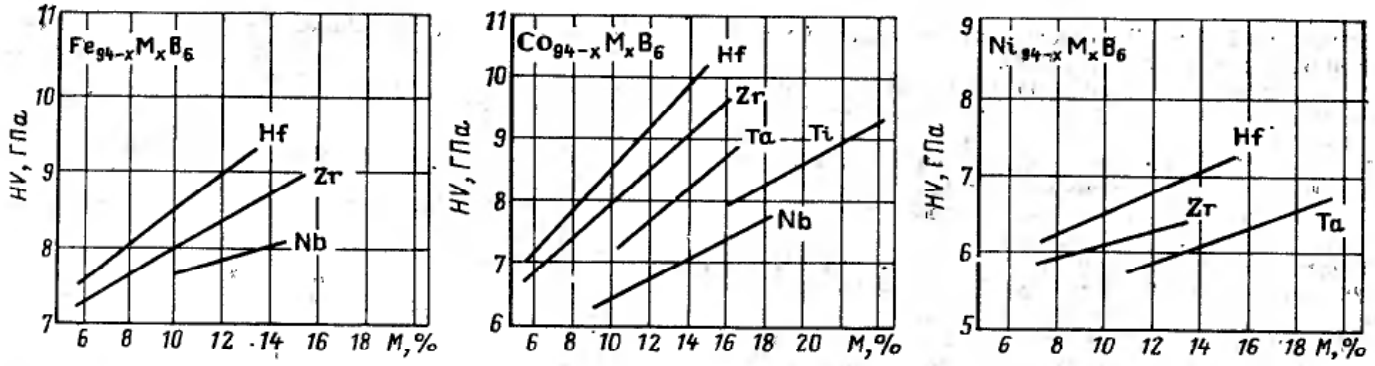


Рис. 3.28. Зависимость твердости HV аморфных сплавов $Fe_{94-x}M_xB_6$, $Co_{94-x}M_xB_6$ и $Ni_{94-x}M_xB_6$ где M=Ti, Zr, Rf, Nb и Ta, от массового содержания компонента M [40]

Таблица 3.61. **Значения объемных модулей аморфных (B_a) и жидких (B) металлов, их соотношений со значениями в жидкой фазе и скачка объема при кристаллизации ($\Delta V/V$)** [33]

Материал (состав, %)	B_a, ГПа	B/B_a	$\Delta V/V$, %
$Pd_{80}Si_{20}$	182	1,062	—
$Pd_{77,5}Cu_6Si_{16,5}$	182	1,065	1,6
$Co_{17}Sm_2$	133	1,045	1,6
Na (жидкий при T_m)	54	1,08	2,5
Cs (жидкий при T_m)	16	1,13	2,6

Таблица 3.62. **Значения модуля Юнга E_a и сдвиговых модулей G_a аморфных сплавов и модулей E_c и G_c кристаллизованных сплавов** [33]

Материал (состав, %)	E_a, ГПа	E_c/E_a	G_a, ГПа	G_c/G_a
$Pd_{80}Si_{20}$	—	—	35,5	1,34
$Pd_{81}S_{19}$	80	1,26	—	—
$Co_{89,5}Sm_{10,5}$	—	—	42,6	1,36
$Co_{85}P_{15}$	—	—	39	1,34
$Co_{80}P_{20}$	105	1,23	—	—
$Fe_{80}B_{20}$	168	1,24	64,9	1,35
$Ni_{76}P_{24}$ (закаленный)	95	1,32	33,5	1,46
$Pd_{77,5}Cu_6Si_{16,5}$ (отожженные)	94	1,24	34,8	1,35
SiO_2	—	—	31	1,38

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Металловедение** и термическая обработка стали: Справочник. Т. 1. — 2-е изд. М.: Изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1961.

2. **Механические** свойства редких металлов/Под ред. Л. Д. Соколова. М.: Металлургия, 1972.

3. **Конструкционные** материалы: В 3-х томах/Под ред. А. Т. Туманова, М.: Советская энциклопедия, 1965.

4. **Буркхардт А.** Механические и технологические свойства чистых металлов: Пер. с нем./Под ред. Я. П. Селиского. М.—Л.: Металлургиздат, 1941.

5. **Промышленные** алюминиевые сплавы: Справочник/ Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. — 2-е изд. М.: Металлургия, 1984.

6. **Савицкий Е. М., Бурханов Г. С.** Металловедение сплавов тугоплавких и редких металлов. — 2-е изд. М.: Наука, 1971.

7. **Фридман Я. Б.** Механические свойства металлов: В 2-х частях: — 3-е изд. М.: Машиностроение, 1974.

8. **Благородные** металлы: Справочник/Под ред. Е. М. Савицкого. М.: Металлургия, 1984.

9. **Потак Я. М.** Высокопрочные стали. Сер. Успехи современного металловедения. М.: Металлургия, 1972.

10. **Титановые** сплавы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1977.

11. **Савицкий Е. М.** Влияние температуры на механические свойства металлов и сплавов. М.: Изд-во АН СССР, 1957.

12. **Гуняев Г. М.** Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981.

13. **Заболоцкий А. А.** Производство и применение композиционных материалов. Итоги науки и техники. Сер. Композиционные материалы. М.: ВИНИТИ АН СССР. 1976.

14. **Структура** и свойства композиционных материалов/К. И. Портной, С. Е. Салибеков, И. Л. Светлов, В. М. Чубаров. М.: Машиностроение, 1979.

15. **Современные** композиционные материалы: Пер. с англ./Под ред. И. Л. Светлова. М.: Мир, 1970

16. **Минералы** и горные породы СССР/Т. Б. Здорик, В. В. Матиас, И. Н. Тимофеев, Л. Г. Фельдман. М.: Мысль, 1970.

17. **Лебедев С. И.** Определение микротвердости минералов. М.: Изд-во АН СССР, 1963.

18. **Алюминиевые** сплавы: Справочник/Пер. с нем. М.: Металлургия, 1979.

19. **Кошелев П. Ф.** Механические свойства сплавов для криогенной техники. М.: Машиностроение, 1971.

20. **Кишкина С. И.** Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1981.

21. **Дроздовский Б. А., Проходцева Л. В., Новосильцева Н. И.** Трещиностойкость титановых сплавов. М.: Металлургия, 1983.

22. **Кудряшов В. Г., Смоленцев В. И.** Вязкость разрушения алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1976.

23. **Методы** испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: Справочное пособие: В 3-х томах. Т. 2 /Под ред. С. И. Кишкиной и Н. М. Склярова. М.: Машиностроение, 1974

24. **Справочник** металлиста: В 5 томах. Т. 2/Под ред. А. Г. Рахштадта, В. А. Брострема. М.: Машиностроение, 1976.

25. **Романив О. Н.** Вязкость разрушения конструк-

ционных сталей. Сер. Достижения отечественного металловедения. М.: Металлургия, 1979.
26. **Сопротивление** развитию усталостных трещин в металлических сплавах, применяемых в железнодорожном транспорте: Сборник научных трудов/Под ред. Н. А. Буше, М. Н. Георнева. М.: Транспорт, 1984.
27. **Циклическая** трещиностойкость металлических материалов и элементов конструкций транспортных средств и сооружений: Сборник научных трудов/Под ред. В. Н. Данилова, Н. Я. Межовой. М.: Транспорт, 1984.
28. **Микляев П. Г., Нешпор Г. С., Кудряшов В. Г.** Кинетика разрушения. М.: Металлургия, 1979.
29. **Степнов М. Н., Гиацинтов Е. В.** Усталость легких конструкционных сплавов. М.: Машиностроение, 1973.
30. **Марин Н. И.** Статическая выносливость элементов авиационных конструкций. М.: Машиностроение, 1968.
31. **Ратиер С. И.** Разрушение при повторных нагрузках. М.: Оборонгиз, 1959.
32. **Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М.** Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975.
33. **Künzi H.-U.** In: Glassy Metals II, ed. H.-J. Güntherodt, H. Beck. Topics in Applied Physics. Vol. 52. N. Y.: Springer, Berlin, Heidelberg, 1982.
34. **Masumoto T.** — Sci. Rep. RITU. 1977. Vol. A26. P. 246.
35. **Tonizawa S., Masumoto T.** — Sci. Rep. RITU. 1977. Vol. A26. P. 263.
36. **Masumoto T., Maddin R.** — Acta Metallurgica. 1971. Vol. 19. P. 725.
37. **Davis L. A., Ray R., Ohou C.-P., O'Handley R. C.** — Scripta Metallurgica. 1976. Vol. 10. P. 541.
38. **Chen H. S.** — Rept Progr. Phys. 1980. Vol. 43. P. 353.
39. **Gilman J. J.** — J. Phys. et radium (Paris). 1980. Vol. 41. C. 8. P. 811.
40. **Inoue A., Kobayashi K., Nose M., Masumoto T.** — Ibid. 1980. Vol. 41. C. 8. P. 831.
41. **Ishio S., Sato Y., Ikeda T., Takahashi M.**//J. Non-Crystalline Sol. 1984. Vol. 61, 62, P. 955.
42. **Bengus V. Z., Tabachnikova E. D., Startsev V. I.** — Phys. Stat. Sol. (a). 1984. Vol. 81. P. K11.

ГЛАВА 4
СЖИМАЕМОСТЬ

Б. В. Виноградов

4.1. ВВЕДЕНИЕ

Сжимаемость, или объемная упругость, есть обратимое уменьшение объема вещества под действием всестороннего давления. Количественно сжимаемость характеризуется величиной k, $Па^{-1}$,

$$k = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right) = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right), \qquad (4.1)$$

где V — объем, $м^3$; p — давление, Па; ρ — плотность, $кг \cdot м^{-3}$. Употребляются также термины — коэффициент сжимаемости, несжимаемость, коэффициент несжимаемости. Величина, обратная сжимаемости, называется модулем объемной упругости K, Па, $K = 1/k$ (модуль всестороннего сжатия, модуль сжимаемости, модуль несжимаемости).

Различают изотермическую k_T и адиабатическую k_S сжимаемости, которые связаны между собой соотношением [1]

$$k_T = \frac{c_p}{c_V} k_S = k_S + \frac{T\alpha^2}{c_p \rho}, \qquad (4.2)$$

где c_p и c_V — удельные теплоемкости при постоянных давлении и объеме, $Дж \cdot кг^{-1} \cdot град^{-1}$; T — температура, К; α — объемный коэффициент теплового расширения, $К^{-1}$. Для твердых тел при комнатной температуре различие между k_T и k_s обычно не превосходит нескольких процентов. (В табл. 4.1, 4.2 адиабатическая сжимаемость отмечена индексом S, изотермическая — индексом T.)

Для анизотропных твердых тел относительное изменение размеров под давлением зависит от направления и в кристаллах характеризуется линейной сжимаемостью в направлении главных осей:

$$k_a = -\frac{1}{a}\left(\frac{\partial a}{\partial p}\right); \quad k_b = -\frac{1}{b}\left(\frac{\partial b}{\partial p}\right);$$
$$k_c = -\frac{1}{c}\left(\frac{\partial c}{\partial p}\right). \qquad (4.3)$$

Сжимаемость связана с упругими постоянными s_{ij}:

$$k = \sum_{i,\,j=1}^{3} s_{ij} = s_{11} + s_{22} + s_{33} + 2(s_{23} + s_{13} + s_{12}). \qquad (4.4)$$

Для изотропных твердых тел

$$1/k = K = E/3(1 - 2\sigma), \qquad (4.5)$$

где E — модуль Юнга, Па; σ — коэффициент Пуассона.

Сжимаемость зависит от давления и температуры. Экспериментальные результаты зависимости объема твердых тел от давления представлены в табл. 4.1—4.4 в виде

$$(V - V_0)/V_0 = -ap + bp^2 - cp^2. \qquad (4.6)$$

Для некоторых данных приведена погрешность эксперимента (в круглых скобках, по последним значащим цифрам). В этом случае сжимаемость при давлении p определяется по формуле

$$k = (a - 2bp + 3cp^2)/(1 - ap + bp^2 - cp^3), \qquad (4.7)$$

начальная сжимаемость $k_0 = k(p \simeq 0) = a$. Часть результатов представлена в виде параметров уравнения Мурнагана [2]

$$p = \frac{K}{K'}\left[\left(\frac{V_0}{V}\right)^{K'} - 1\right] \qquad (4.8)$$

или его модификации [3]

$$p = \frac{3K}{2}\left[\left(\frac{V_0}{V}\right)^{\frac{7}{3}} - \left(\frac{V_0}{V}\right)^{\frac{5}{3}}\right] \times$$
$$\times \left\{1 - \xi\left[\left(\frac{V_0}{V}\right)^{\frac{2}{3}} - 1\right]\right\}, \qquad (4.9)$$

где $K' = \partial K/\partial p$ — производная модуля объемной упругости по давлению; ξ — безразмерный параметр.

Для идеального газа $v=RT/p$ и $k=1/p$, где v — объем, м^3·моль$^{-1}$; R — универсальная газовая постоянная, Дж·К$^{-1}$·моль$^{-1}$; T — температура, К. Свойства реальных газов и жидкостей описываются более слжными p—v-соотношениями [4], например уравнением Тэйта

$$v = v_0 \left(1 - C \ln \frac{B+p}{B+p_0}\right) \qquad (4.10)$$

или логарифмическим уравнением

$$v = \frac{A}{\lg (p/p_0) - A/v_0}. \qquad (4.11)$$

В табл. 4.6, 4.9 прнведены параметры уравнения Тэйта для ряда жидкостей и плотных газов. В этом случае сжимаемость k определяется выражением

$$k(p) = C/(B+p)\left(1 - C \ln \frac{B+p}{B+p_0}\right). \qquad (4.12)$$

Часто p—v—T-свойства газов и жидкостей характеризуют безразмерной величнной $Z=pv/RT$, которая иазывается фактором сжимаемости. На рис. 4.1 показаны p—v—T-соотношения в жидкостях и газах в виде семейства кривых $Z=Z(T_r, p_r)$, где $T_r=T/T_c$; $p_r=p/p_c$; T_c и p_c — приведенные температура н давление; T_c и p_c — критические температура и давление. В широкой области давлений и температур значения Z, приведенные на рис. 4.1, отличаются от экспериментальиых не более чем на 4—6 % для большинства веществ (кроме сильно полярных) [5].

Сжнмаемости чистых жидкостей и газов, а также смесей можно рассчитать по данным [5]. Информация о сжнмаемости и модулях всестороннего сжатия твердых тел и жидкостей содержится в [6]. Данные о сжимаемости и модулях всестороннего сжатия твердых тел содержатся в [7—10].

4.2. СЖИМАЕМОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ (табл. 4.1—4.6)

Таблица 4.1. **Сжимаемость и модуль объемного сжатия элементов. Если не указаны p и T, данные отиосятся к атмосферному давлению и комнатной температуре [буквами T и S отмечены изотермическая и адиабатнческая сжимаемости, a, b, c — коэффициенты уравнения (4.6)]**

Элемент	a, 10^{-12} Па$^{-1}$	b, 10^{-22} Па$^{-2}$	c, 10^{-30} Па$^{-3}$	K, 10^9 Па	K'	Литература
Азот (65 К)*	801	—	—	—	—	[7]
Алюминий (*T*)	12,676	3,347	—	78,877	3,165	[11]
Аргон (4 К) (*T*)	—	—	—	2,86	7,2	[13]
Барий (*T*)	105,69	152,21	1,124	9,462	1,725	[11]
Бериллий	9,97	—	—	—	—	[12]
Бор	5,58	0,8	—	—	—	[7]
Ванадий (*T*)	7,011	3,245	—	139,42	18,24	[14]
Висмут (*T*)	32,286	26,529	—	30,973	4,09	[11]
Водород (4 К)*	5000	—	—	—	—	[7]
н-Водород (4,2 К) (*T*)	—	—	—	0,170 (6)	7,0 (3)	[15]
пара-Водород, (6—10 К)	5470 (180)	—	—	—	—	[16]
Вольфрам (*T*)	3,475	1,123	—	300,09	19,10	[14]
Гадолиний (Т)	27,271	14,029	—	35,479	4,77	[14]
Галлий	20	—	—	—	—	[7]
Гафний (*T*)	8,8745	—	—	108,95	0.594	[14]
Германий	12,93 [7]	3,6 [7]	—	75,02 (S)	4,55 (S)	[18]
Гольмий (*T*)	25,2	—	—	—	—	[12]
Диспрозий (*T*)	23,749	11,259	—	40,327	5,113	[14]
Европий	86,62	107,79	1,345	—	—	[17]
Железо (*T*)	5,8441	1,5008	—	171,11	7,789	[11]
Золото (*T*)	6,01	1,36	—	166,4	6,51	[19]
Индий (*T*)	25,709	20,143	0,125	38,897	5,095	[11]
Иод (*T*)	114,89	337,83	6,331	8,37	6,047	[14]
Иридий (*T*)	2,82	—	—	—	—	[12]
Иттербий	78,1	93,01	1,108	—	—	[17]
Иттрий (*T*)	22,251	7,108	—	44,93	2,2	[14]
Кадмий (*T*)	21,140	11,358	—	47,304	4,083	[11]
Калий (Т)	297,13	1440,4	48,26	3,40 (1)	2,99 (5)	[20]

Элемент	a, 10^{-12} Па$^{-1}$	b, 10^{-22} Па$^{-2}$	c, 10^{-30} Па$^{-3}$	K, 10^9 Па	K'	Литература
Кальций (T)	54,757	54,206	0,395	18,263	2,616	[11]
Кобальт (T)	6,02	2,599	—	167,1	17,327	[14]
Кремний (T)	10,211	2,96	—	100,75	4,72	[14]
Криптон (77 К)*	560	—	—	—	—	[7]
Криптон (115 К) (T)	—	—	—	1,34	7,94	[21]
Ксенон (4 К)	—	—	—	3,63	7,2	[13]
Лантан (T)	40,623	31,874	0,183	24,617	2,863	[11]
Литий (T)	80,037	100,97	0,675	11,8 (2)	3,33 (9)	[20]
Лютеций (T)	24,3	—	—	—	—	[12]
Магний (T)	28,396	14,78	—	33,561	4,759	[14]
Марганец (303 К)	8,03	4,2	—	—	—	[7]
Медь (T)	6,621	1,099	—	151,03	4,01	[11]
Молибден (T)	3,951	1,115	—	253,1	13,288	[11]
Мышьяк	31,6	—	—	—	—	[7]
Натрий (T)	162,4	547,7	15,66	6,2 (1)	3,5 (1,0)	[20]
Неодим (T)	29,958	12,794	—	32,552	3,016	[14]
Неон (4 К)*	1006	—	—	—	—	[7]
Никель (T)	5,5475	2,7045	—	180,26	16,58	[11]
Ниобий (T)	6,778	2,549	—	144,2	14,5	[14]
α-Олово (T)	9,01	—	—	—	—	[12]
β-Олово (T)	18,155	6,123	—	55,081	2,715	[11]
Палладий	5,34	0,9	—	—	—	[7]
Платина	3,59	—	—	—	—	[7]
Плутоний	19,8	—	—	—	—	[7]
Празеодим (T)	33,824	19,278	0,132	30,223	1,612	[14]
Рений (T)	2,69	—	—	—	—	[12]
Родий	3,67	—	—	—	—	[7]
α-Ртуть (100 К)	28,9	—	—	—	—	[7]
(200 К)	34,8	—	—	—	—	[7]
(234 К)	37,0	—	—	—	—	[7]
β-Ртуть (50 К)	21,7	—	—	—	—	[7]
Рубидий	369,76	2351,7	111,3	2,66 (2)	3,23 (2)	[20]
Рутений (T)	3,11	—	—	—	—	[12]
Самарий	26,38	10,46	0,0415	—	—	[17]
Свинец (T)	23,611	13,222	—	42,353	3,744	[11]
Селен (кристалл) (T)	122,29	394,66	8,66	7,90	5,828	[14]
Селен (стекло)	173	—	—	—	—	[7]
Сера (T)	103,5	276,14	4,89	8,843	6,55	[14]
Серебро (T)	9,031	2,317	—	110,73	4,681	[11]
Скандий	15,21	3,083	0,006	—	—	[17]
Стронций (T)	84,756	137,98	1,811	12,08	2,498	[14]
Сурьма (T)	23,535	9,78	—	40,43	4,282	[14]
Таллий (T)	26,646	14,623	—	37,53	3,119	[11]
Тантал (T)	4,953	0,594	—	201,9	3,842	[11]
Теллур (T)	47,716	74,735	0,66	18,242	8,404	[11]
Тербий (T)	25,1	—	—	—	—	[12]
Титан (T)	9,1598	1,745	—	109,35	3,355	[14]
Торий (T)	18,4	—	—	—	—	[12]
Тулий (T)	25,2	—	—	—	—	[12]
Углерод (алмаз)	1,8 [7]	—	—	560 (T)	4 (T)	[8]
Углерод (графит)	30 [7]	—	—	33,7 (T)	12 (T)	[8]
Уран	10,2	5	—	—	—	[7]
Фосфор (белый)	205	—	—	—	—	[7]
Фосфор (черный)	29,6	—	—	—	—	[7]
Фосфор (красный)	55,6	—	—	—	—	[7]
Хром	5,25	0,9	—	—	—	[7]
Цезий (T)	500	—	—	—	—	[12]
Церий (T)	54,25	46,32	0,585	—	—	[17]
Цинк (T)	16,271	5,644	—	61,459	3,264	[11]
Цирконий (T)	9,676	1,77	—	102,84	3,142	[14]
Эрбий (T)	22,009	8,3045	—	44,913	3,537	[14]

* Параметр ξ уравнения (4.9) равен: —2, 3 — азот, 65 К; —1,9 — водород, 4 К; —5,1 — криптон, 77 К; —4 — неон, 4 К.

Таблица 4.2. **Сжимаемость и модуль объемной упругости некоторых неорганических соединений [буквами *T* и *S* отмечены изотермическая и адиабатическая сжимаемости, *a*, *b*, *c* — коэффициенты в уравнении (4.6)]**

Вещество	a, 10^{-12} Па$^{-1}$	b, 10^{-22} Па$^{-2}$	c, 10^{-30} Па$^{-3}$	K, 10^9 Па	K'	Литература
$(NH_4)^2{}_3$ Al	65,1	—	—	—	—	[10]
NH_4Br (*T*)	62,162	102,73	98,655	—	—	[22]
$NH_4H_2PO_4$	34,75—45,00	—	—	—	—	[10]
NH_4Cl (*T*)	59,396	104,55	96,573	17,8 [9] (*S*)	—	[22]
AlB_{12} (*S*)	7,19	—	—	139	—	[23]
Al_2O_3 (*S*)	—	—	—	255,07	4,19	[10]
AlSb	16,9 (*T*)	—	—	59,2 [9] (*S*)	—	[24]
$Ba(NO_3)_2$	30,74—30,9	—	—	—	—	[10]
BaO (*T*)	—	—	—	74,06	5,67	[25]
$BaSO_4$ (*S*)	—	—	—	22,3	—	[9]
$BaTiO_3$ (куб.)	8,91	—	—	—	—	[10]
(тетр.)	5,36	—	—	—	—	[10]
BaF_2 (*T*)	17,59	9,6	—	56,82	—	[26]
Be_2B (*S*)	8,06	—	—	124	—	[23]
Be_4B (*S*)	8,13	—	—	123	—	[23]
BeO (*T*)	4,13	4,3	—	—	—	[27]
BN (гекс.) (*T*)	—	—	—	25,5	15	[8]
BN (куб.)	5	—	—	—	—	[28]
VB_2	3,47	—	—	—	—	[10]
V_3Ge (*S*)	—	—	—	169,2 (3)	3,80 (22)	[29]
V_3Si (*S*)	—	—	—	176,37 (7)	4,30 (4)	[30]
VC	2,65	—	—	—	—	[10]
Bi_2Te_3	27,3	—	—	—	—	[31]
H_2O (4,2 K)	91,743	—	—	—	—	[10]
H_2O VII, p=2,2 ГПа	—	—	—	22,7	5,3	[32]
D_2O VII, p=2,2 ГПа	—	—	—	24,2	4,6	[32]
WSi_2	2,96	—	—	—	—	[10]
WC	1,58—1,73	—	—	—	—	[10]
$WC_{1,007}$ (*S*)	3,03 (5)	—	—	3,29	—	[33]
GaN	5	—	—	—	—	[24]
GaAs (*T*)	—	—	—	74,66	4,67	[18]
GaSb (*T*)	—	—	—	56,14	4,78	[34]
GaP (*S*)	11,27 (6)	—	—	—	—	[35]
$HfC_{0,967}$ (*S*)	4,12 (2)	—	—	2,42	—	[33]
GeO_2 (*T*)	—	—	—	39,1 (4)	2,2 (5)	[36]
(*S*)	—	—	—	25,9	6,15	[37]
$HoZn_2$ (*S*)	—	—	—	6,43	—	[38]
EuO	—	—	—	110 (5)	—	[39]
EuSe	—	—	—	52 (5)	—	[39]
EuS	—	—	—	61 (5)	—	[39]
EuTe	—	—	—	40 (5)	—	[39]
Fe_3Al (*T*)	—	—	—	136	4,6	[8]
FeAl (*T*)	—	—	—	138	5,6	[8]
FeO (*T*)	—	—	—	154	3,4	[8]
Fe_3O_4 (*S*)	—	—	—	161,6	—	[9]
Fe_2O_3 (*S*)	—	—	—	98	—	[9]
Fe+8% Si (*T*)	—	—	—	174	4,6	[8]
Fe_3Si (*T*)	—	—	—	250	—2,0	[8]
Fe+5% Ni (ОЦК)	—	—	—	155 (1)	4,2 (8)	[40]
(ГПУ)	—	—	—	209,0 (1,5)	4,0	[40]
InBi	29,1	—	—	—	—	[31]
InAs	17,2	—	—	—	—	[24]
InSb	22,0	—	—	46,9 [9] (*S*)	—	[24]
In+10% Tl	25,0	—	—	—	—	[41]
InP	13,8	—	—	—	—	[24]
YbO	—	—	—	130	4	[42]
YbSe	—	—	—	61 (5)	—	[39]
YbS	—	—	—	72 (5)	—	[39]
YbTe	—	—	—	46 (5)	—	[39]

Вещество	a, 10^{-12} Па$^{-1}$	b, 10^{-22} Па$^{-2}$	c, 10^{-36} Па$^{-3}$	K, 10^9 Па	K'	Литература
CdO (T)	—	—	—	108	9	[8]
Cd_3As_2 (T)	20	—	—	—	—	[43]
CdSe (T)	35,8	13,9	2,98	—	—	[27]
CdS (T)	26,3	80	1,43	—	—	[27]
CdTe (T)	39,8	88	1,09	—	—	[27]
K_3Al	63,6	—	—	—	—	[10]
KBr (T)	60,351	53,606	—	15,5 [9] (S)	—	[22]
KI (T)	78,86	112,85	—	12,38 [9] (S)	—	[22]
KF (T)	61,814	78,118	—	—	—	[22]
KCl (T)	54,906	57,969	—	—	—	[22]
CaO (T)	—	—	—	112,0	3,9	[8]
CaS (T)	—	—	—	56,7	4,9	[8]
CoO	20 (1) [44]	—	—	190,5	3,9	[8]
CoF_2	9,2	—	—	—	—	[45]
α-SiO_2		—	—	36,4—37,7	—	[10]
β-SiO_2	17,71	—	—	56,5 [9] (S)	—	[10]
SiO_2 (стишовит)	—	—	—	481,5 (S)	—	[9]
SiC	4,26	—	—	—	—	[10]
β-SiC	4,6	—	—	—	—	[10]
SiP_2	—	—	—	128,4 (3)	8,2 (5)	[46]
LiBr (T)	38,951	21,239	—	25,66 [9] (S)	—	[22]
LiH	—	—	—	32,35	3,80 (15)	[47]
Li^7H	29,8	—	—	—	4	[48]
Li^6H	29,5	—	—	—	4	[48]
Li^7D	29,4	—	—	—	4	[48]
Li^6D	28,5	—	—	—	4	[48]
LiI (T)	57,466	66,674	43,154	18,83 [9] (S)	—	[22]
LiF (T)	15,491	6,5364	—	69,8 [9] (S)	—	[22]
LiCl (T)	30,342	13,705	—	31,53 [9] (S)	—	[22]
MgO	6,45—6,52	—	—	178,0 [8] (T)	4 [8] (T)	[10]
$MgCu_2$ (S)	—	—	—	87,99	—	[49]
Mg_2Sn (S)	—	—	—	41,66	—	[50]
MgF_2 (T)	10,0	—	—	—	—	[45]
MnBi парамагнетик	26,4	—	—	—	—	[51]
ферромагнетик	21,0	—	—	—	—	[51]
MnO	—	—	—	144,0	3,3	[8]
MnAs 273 K	27,9	—	—	—	—	[51]
315 K	57,9	—	—	—	—	[51]
MnS (T)	—	—	—	81,0	3,3	[8]
MnF_2 (T)	11,5	—	—	—	—	[45]
Cu_3Au	5,25—6,30	—	—	—	—	[10]
CuBr (T)	29,325	25,314	22,872	—	—	[22]
CuGa	7,34—7,44	—	—	—	—	[10]
CuGe	7,34—7,51	—	—	—	—	[10]
Cu_2O	—	—	—	111,96 (27)	—	[52]
CuSi	7,17—7,53	—	—	—	—	[10]
CuZn	7,47—7,87	—	—	116.2 [9] (S)	—	[10]
$MoSi_2$	3,57	—	—	—	—	[10]
Mo_3Si_2	9,79	—	—	—	—	[10]
As_2Se_3 (стекло)	69,6 (S)	—	—	14,37 (S)	—	[53]
β-As_4S_3 (T)	—	—	—	17,0	5,5	[54]
$NaNO_2$	—	—	—	21,9 (2)	4,3 (8)	[55]
$NaNO_3$	—	—	—	25,8 (6)	6,6 (1,5)	[55]
NaBr (T)	48,734	51,871	34,037	21,07 [9](S)	—	[22]
$NaBrO_3$	32,4	—	—	30,8 [9](S)	—	[10]
NaI (T)	66,622	96,809	81,299	15,0 [8]	4,1 [8]	[22]
NaF (T)	20,648	9,0621	—	45,6 [8]	5,7 [8]	[22]
NaCl (T)	42,730	46,578	32,499	26,4 [8]	3,9 [8]	[22]
$NaClO_3$	36,63—39,11	—	—	25,6 [9] (S)	—	[10]
NiO (T)	—	—	—	199,0	4,1	[8]
NiF_2 (T)	8,4 [45]	—	—	119,75	5,07	[56]
NbO_2 (S)	—	—	—	236 (6)	—	[57]
NbC	4,38 [10]	—	—	320,0 (T)	14,0 (T)	[8]
SnI_4	201 [58]	—	—	7,9 (T)	5,8 (T)	[8]
SnO_2 (S)	—	—	—	212,3	5,13	[59]

Вещество	a, 10^{-12} Па$^{-1}$	b, 10^{-22} Па$^{-2}$	c, 10^{-30} Па$^{-3}$	K, 10^9 Па	K'	Литература
PrSb (*T*)	19,8	—	—	—	—	[60]
RbBr (*T*)	76,9	—	—	13,81 [9] (*S*)	—	[61]
RbI (*T*)	94,8	—	—	11,1 [9] (*S*)	—	[61]
RbF (*T*)	38,1	—	—	27,33 [9] (*S*)	—	[61]
RbCl (*T*)	64,0	—	—	16,2 [9] (*S*)	—	[61]
HgSe	25,4	—	—	—	—	[24]
HgTe	24,0	—	—	—	—	[24]
HgS	26,7	—	—	—	—	[24]
SmSe	—	—	—	40 (5)	—	[39]
SmS	—	—	—	15,1	—	[39]
SmTe	—	—	—	40 (5)	—	[39]
$Pb(NO_3)_2$	27,93	—	—	37,0 [9] (*S*)	—	[10]
PbSe (*S*)	—	—	—	54,1	—	[62]
PbS	16,08—16,85	—	—	62 [9] (*S*)	—	[10]
AgBr (*T*)	24,981	13,451	—	40,7 [9] (*S*)	—	[22]
AgIn	10,18	—	—	—	—	[10]
AgCd	9,75—9,86	—	—	—	—	[10]
AgMg	10,02—10,38	—	—	86 [8] (*T*)	3.6 [8] (*T*)	[10]
AgSn	9,82	—	—	—	—	[10]
AgPd	9,4	—	—	—	—	[10]
AgF (*T*)	24,665	38,967	—	—	—	[22]
AgCl (*T*)	22,951	11,8	—	44,1 [9] (*S*)	—	[22]
AgZn	9,69—9,87	—	—	—	—	[10]
$SrTiO_3$	5,46 [10]	—	—	176 (*T*)	4,4 (*T*)	[63]
SrO (*T*)	—	—	—	89,28	5,23	[25]
TlAl	54	—	—	—	—	[10]
TlBr	44,51	—	—	22,5 [9] (*S*)	—	[10]
TlBrI	45,45—50,42	—	—	—	—	[10]
TlBrCl	43,92	—	—	—	—	[10]
TlI (*T*)	—	—	—	45	5,0	[8]
TlCl	38,75	—	—	—	—	[64]
TaC (*T*)	—	—	—	330	3,3	[8]
TeO_2	22,33	—	—	—	—	[65]
TiN	3,42—3,47	—	—	—	—	[10]
$TiBe_{12}$ (*S*)	7,46	—	—	134	—	[23]
TiB_2 (*S*)	3,98	—	—	251	—	[23]
TiO (*T*)	3,68	—	—	—	—	[66]
$TiSi_2$	6,12	—	—	—	—	[10]
TiC	4,38 [10]	—	—	220 (*T*)	8 (*T*)	[8]
TmSb (T)	17,8	—	—	—	—	[60]
TmTe	—	—	—	46,5	—	[39]
UN	5,35	—	—	—	—	[10]
UO_2 (*T*)	—	—	—	210 (10)	7 (2)	[67]
α-P_4S_3 (*T*)	—	—	—	5,9	—	[68]
CrN	4,36—4,38	—	—	—	—	[10]
Cr_2FeO_4 (*S*)	—	—	—	203,7	—	[9]
α-Cr_2O_3	3,92	—	—	—	—	[10]
CrAs	28,3	—	—	—	—	[69]
CsBr (*T*)	65,652	96,190	73,963	18,0 [9] (*S*)	—	[22]
CsI (*T*)	78,488	130,42	115,48	12,4 [9] (*S*)	—	[22]
CsF (*T*)	42,5	—	—	—	—	[61]
CsCl (*T*)	56,401	73,842	54,194	—	—	[22]
CeAs (*T*)	7.9	—	—	—	—	[70]
CeSb (*T*)	10	—	—	—	—	[70]
CeP (*T*)	6,6	—	—	—	—	[70]
ZnO (*T*)	22,2	3,7	—	—	—	[27]
ZnSe (*T*)	24,69	—	—	—	—	[27]
ZnS (*T*)	13,1	4,10	—	—	—	[27]
$ZnSO_4$	45,34	—	—	—	—	[10]
ZnTe (*T*)	24,27	—	—	—	—	[27]
ZnF_2 (*T*)	9,6	—	—	—	—	[...]
ZrN	3,74—3,77	—	—	—	—	[10]
$ZrSi_2$	6,12	—	—	—	—	[10]
ZrC (*T*)	5,9 (5) (*S*) [33]	—	—	195,0	8	[8]

Таблица 4.3. **Сжимаемость минералов [7]. Приведены коэффициенты уравнения (4.6)**

Продолжение табл. 4.3

Вещество	a, 10^{-12} Па$^{-1}$	b, 10^{-22} Па$^{-2}$	Вещество	a, 10^{-12} Па$^{-1}$	b, 10^{-22} Па$^{-2}$	Вещество	a, 10^{-12} Па$^{-1}$	b, 10^{-22} Па$^{-2}$	Вещество	a, 10^{-12} Па$^{-1}$	b, 10^{-22} Па$^{-2}$
Авгит	10,2	—	Вюрцит	13,6	—	Мусковит	12	—	Фаялит	9,1	—
Альбит	20,2	21,6	Галенит	18,7—	—	Нефелин	20,5	5,2	Флогопит	23,4	18,2
Альмандин	5,45—	—		19,6		Ортоклаз	21,23	14,5	Флюорит	12,2—	6,5
	5,7		Гипс	25	—	Периклаз	5,98	1		12,6	
Анальцим	19,70—	—	Диопсид	9,3	3,1	Пирит	6,8—	—	Форстерит	7,9—	—
	36,73		Доломит	12,2	—		7,1			8,2	
Ангидрит	18,4	—	Жадеит	7,5—	—	Родохрозит	13	—	Халькопирит	12,9	—
Англезит	19,4	—		11,1		Рутил	4,83	0,92	Хромит	4,9	—
Апатит	10,91	4,1	Ильменит	5,6	—	Сидерит	10	—	Целестит	15,7—	—
Арагонит	15,5	—	Иодаргирит	41,1	—	Сподумен	7,03	1,5		16,3	
Аргентит	25,1	33,8	Кальцит	13,67	3,9	Ставролит	8	—	Церуссит	19,1	—
Арсенопирит	9,9	—	Кераргирит	24	—	Стронцианит	17,5	—	Цинкит	7,8	—
Барит	17,7—	—	Кобальтин	7,67	1,9				Циркон	8,6	—
	18,1		Куприт	19,4	19	Сфалерит	13,03	1,28	Эгирин	9,4	—
Берилл	5,403	0.94	Лабрадор	13,9—	—	Тенардит	23,7	23.7			
Бромирит	27,4	—		15,0		Топаз	6,11	1,1	Энстатит	10,1	—
Висмутин	33,2	—	Марказит	8,2	—	Турмалин	8,16	1,95	Эпсомит	22,9	—
Витерит	20,3	—	Микроклин	19,2	13						

Таблица 4.4. **Сжимаемость и модуль объемной упругости органических веществ и полимеров**

Вещество	k, 10^{-12} Па$^{-1}$	K, 10^9 Па	K'	K'', 10^{-10} Па$^{-1}$	Литература
Адамантан	243	—	—	—	[71]
Антрахинон	—	8,092	11,016	—15,62	[72]
Антрацен	—	6,786	8,960	—9,261	[72]
Антрон	—	7,344	9,061	—10,027	[72]
Бензил	—	6,129	7,168	—7,063	[72]
Бензофенон	—	6,421	10,328	—12,413	[72]
Гексабромбензол	—	8,089	11,067	—13,51	[72]
Гексаметилбензол	—	5,600	10,272	—21,083	[72]
Гексаметилентетрамин	117	—	—	—	[71]
н-Гептакозан	193	—	—	—	[71]
Гексахлорбензол	—	8,388	8,223	—	[72]
пара-Дийодбензол	—	7,8	7,0	—	[8]
Дифенил	—	4,570	9,942	—13,088	[72]
9-10-дифенилантрацен	—	7,316	9,467	—11,258	[72]
Нафталин	65 (5)	—	—	—	[73]
Найлон 6 (γ)	179	—	—	—	[71]
Пентаэритрит	83	—	—	—	[71]
Перилен	—	10,141	7,701	—	[72]
Перинафтенон	—	7,706	7,778	0,99	[72]
Поли-1-бутилен	202	—	—	—	[71]
Поливинилиденфторид II	94,7	—	—	—	[71]

Вещество	k, 10^{-12} Па$^{-1}$	K, 10^{-9} Па	K'	K'', 10^{-10} Па$^{-1}$	Литература
Поли(4-метил-1-пентан)	367	—	—	—	[71]
Полиоксиметилен	117	—	—	—	[71]
Полипропилен	207	—	—	—	[71]
Политетраметиленоксид-1	178	—	—	—	[71]
Политетрафторэтилен, 297 К	250	—	—	—	[71]
Политетрафторэтилен II, 283 К	189	—	—	—	[71]
Полиэтилен низкой плотности	192	—	—	—	[71]
Полиэтилен высокой плотности	156	—	—	—	[71]
Поли(этилен-оксибензоат) *α*	138	—	—	—	[71]
пара-Терфенил	—	5,428	9,609	—8,844	[72]

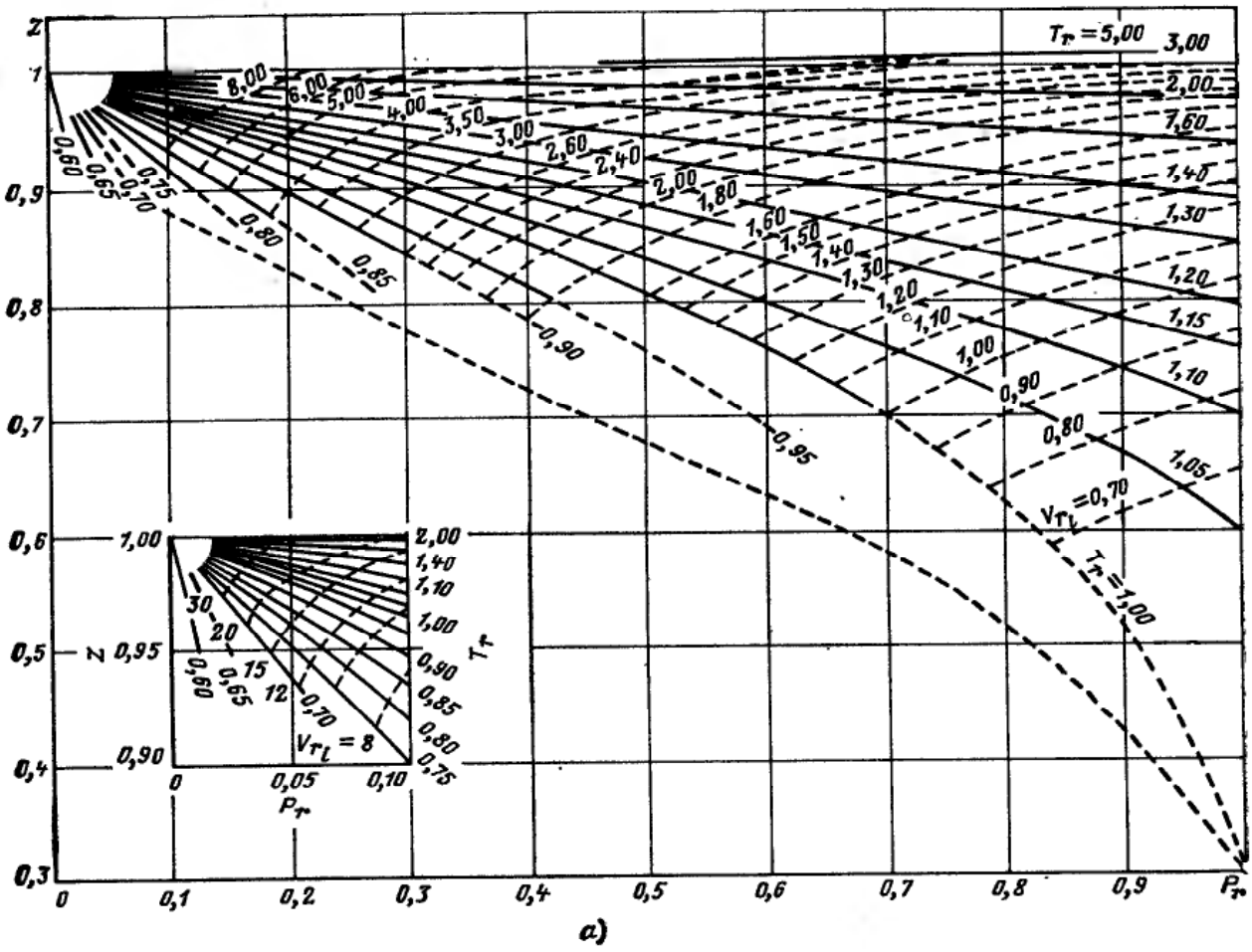
Таблица 4.5. Линейная сжимаемость k_i анизотропных минералов и органических веществ в направлении главных осей

Вещество	k_a, 10^{-12} Па$^{-1}$	k_b, 10^{-12} Па$^{-1}$	k_c, 10^{-12} Па$^{-1}$	Литература
Апатит	4,23	—	2,45	[7]
Барит	5,026	6,816	5,760	[7]
Берилл	1,664	—	2,075	[7]
Графит	—1,65	—	33,1	[74]
Кальцит	2,73	—	8,22	[7]
Кварц	9,95	—	7,18	[7]
Нафталин	55	31	26	[73]
Ортоклаз	10,13	5,59	4,68	[7]
Парафин n-$C_{30}H_{62}$ ($p = 3 \cdot 10^8$ Па)	67	63	—	[75]
Парафин n-$C_{32}H_{66}$ ($p = 5 \cdot 10^8$ Па)	78	67	—	[75]
Полиэтилен высокой плотности	87,7	67,2	1,3	[71]
Рутил	1,90	—	1,05	[7]
Сподумен	1,83	2,50	2,03	[7]
Топаз	2,176	1,504	2,429	[7]
Турмалин	1,65	—	4,86	[7]
Целестит	6,380	4,553	4,615	[7]

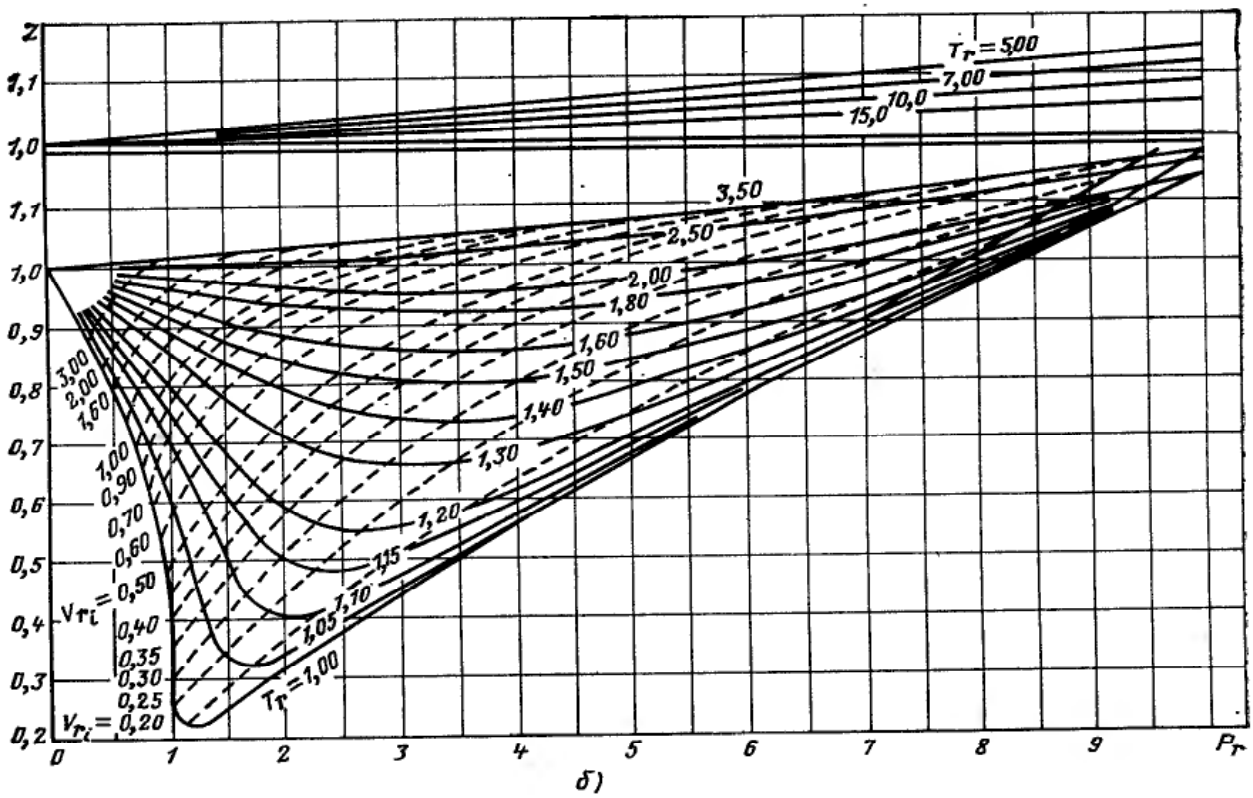
Таблица 4.6. Линейная сжимаемость k_i анизотропных элементов и неорганических соединений в направлении главных осей

Вещество	k_a, 10^{-12} Па$^{-1}$	k_b, 10^{-12} Па$^{-1}$	k_c, 10^{-12} Па$^{-1}$	Литература
$BaTiO_3$	1,9	—	4	[76]
Be	2,87	—	2,23	[7]
BN (гекс.)	—	—	34	[77]
Bi	6,8 (4)	—	18,7 (7)	[78]
Bi_2Te_3	7,3	—	12,7	[31]
In	9,1 (7)	—	7,0 (7)	[79]
InBi	2,5	—	24,1	[31]
Cd	2,299	—	15,88	[7]
CdS	5,9	—	3,5	[80]
Co	1,72	—	1,81	[7]
Mg	9,99	—	9,84	[7]
MnBi (ферромагнетик)	7,9 (5)	—	10,6 (2)	[51]
MnBi (парамагнетик)	5,2 (6)	—	10,5 (2)	[51]
MnAs (273 K)	8,7 (9)	—	9,6 (3)	[51]
MnAs (315 K)	16,6 (6)	23,4 (8)	17,9 (8)	[51]
MnP	1,53	1,54	5,18	[81]
As	—4,6	—	26,4	[82]
β-As_4S_3	22	14	15	[54]
$NaNO_2$	26,3 (1,0)	12,2 (6)	7,3 (7)	[55]
$NaNO_3$	7,18 (6)	—	25 (1)	[55]
β-Sn	6,13	—	6,84	[7]
$PbTiO_3$	1,4	—	14,3	[83]
Se	—3,3	—	40	[84]
$(SN)_x$ (10^5 Па)	55 (5)	22 (2)	50 (5)	[85]
$(SN)_x$ ($2 \cdot 10^9$ Па)	7	3,1	7	[85]
Sb (структ. As)	4,9	—	14,8	[86]
Sb (куб.)	3,2	—	20,6	[86]
Te	28,01	—	—4,23	[7]
TeO_2	8,11	—	6,11	[65]
CrAs (190 K)	4,7	8,5	5,8	[51]
CrAs (293 K)	1,04 (80)	28,0 (80)	0,73 (80)	[51]
Zn	1,59	—	13,76	[7]
α-Zr	5,09 (46)	—	5,99 (93)	[87]
ω-Zr	3,08 (29)	—	2,97 (27)	[87]
$ZrSiO_4$	0,92 (7)	—	0,83 (21)	[88]

4.3. СЖИМАЕМОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ
(табл. 4.7—4.11, рис. 4.1)



а)



б)

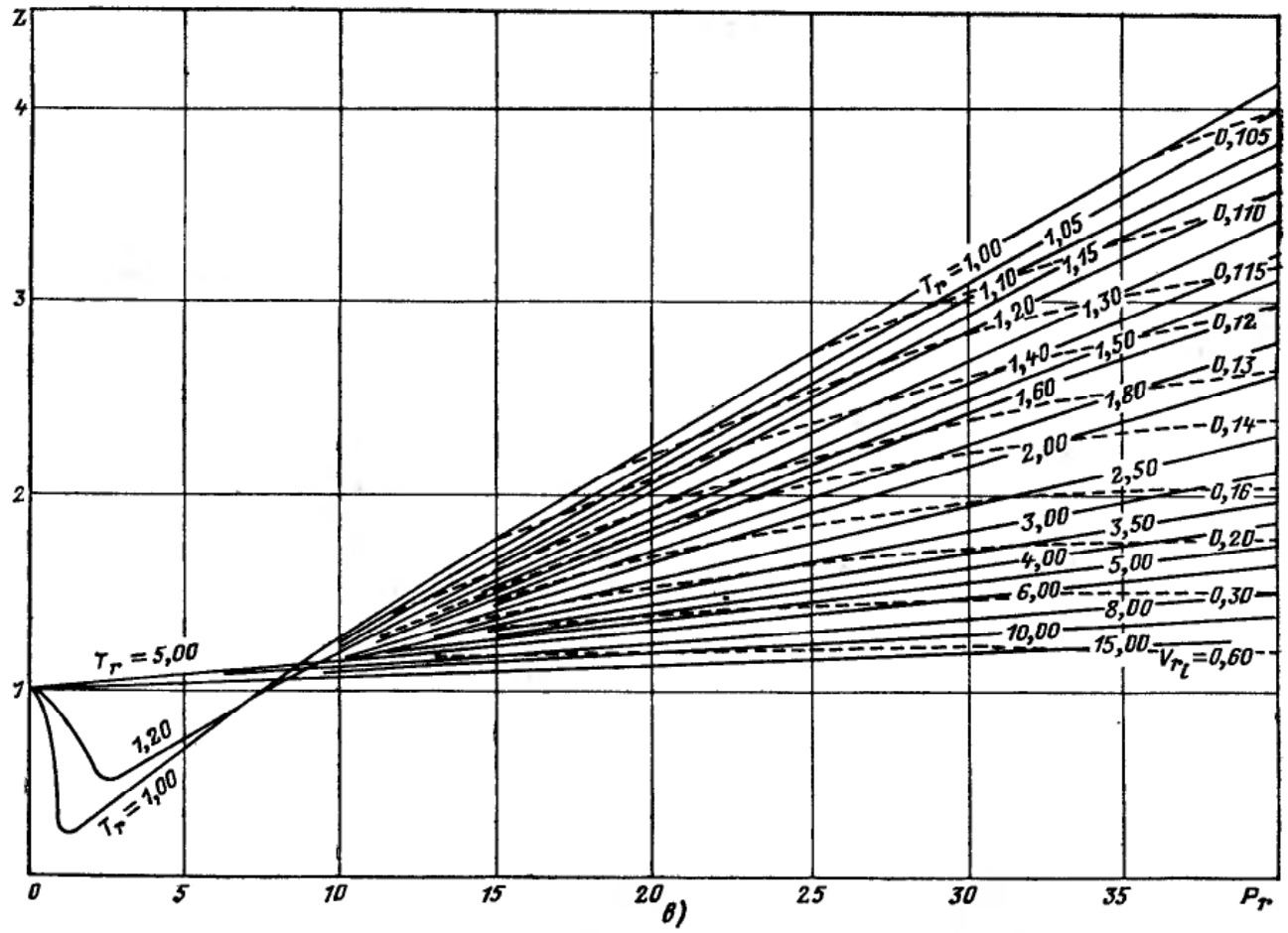


Рис. 4.1. Зависимость фактора сжимаемости жидкостей и газов Z от приведенного давления P_r при различной приведенной температуре T_r [5] (*а*—$0 \leqslant p_r \leqslant 1$; *б*—$0 \leqslant p_r \leqslant 10$; *в*—$0 \leqslant p_r \leqslant 40$)

Таблица 4.7. **Параметры уравнения Тэйта и сжимаемость жидкостей**

Жидкость	T, К	Диапазон давлений, 10^5 Па	C	B, 10^5 Па	k, 10^{-12} Па$^{-1}$	Литература
Ацетон	273	1—500	—	—	809	[89]
	273	500—1000	—	—	582	[89]
Бензин ($C_{7,1}H_{14,5}$)	296,5	—	0,111	874	—	[90]
	373	—	0,111	585	—	[90]
	423	—	0,111	200	—	[90]
Бензол	286	0,4—18	—	—	859	[89]
Бром	293	100—200	—	—	570	[91]
Глицерин	288	1—10	—	—	217	[89]
Керосин	289,5	—	—	—	687	[93]
Масло:						
касторовое	—	—	—	—	470	[92]
миндальное	290	—	—	—	543	[89]
парафиновое	287,8	—	—	—	619	[93]
прованское	293,5	—	—	—	625	[93]
Ртуть	293	—	—	—	40,4	[7]
Сероуглерод	273	1—500	—	—	652	[89]
Спирт:						
бутиловый	290,4	8	—	—	888	[89]
метиловый	273	1—500	—	—	784	[89]
	293	1000—6000	0,1018	937	—	[94]
	323	1000—6000	0,1018	774	—	[94]
пропиловый	293	1000—8000	0,0870	913	—	[94]
	323	1000—7000	0,0870	731	—	[94]
этиловый	273	1—50	—	—	948	[89]
	293	1—50	—	—	1106	[89]
Толуол	298	—	—	—	915	[92]
Углерод четыреххлористый	293	100—200	—	—	895	[89]
Этилацетат	286,3	8—37	—	—	1027	[93]

Таблица 4.8. **Сжимаемость воды k, 10^{-14} Па$^{-1}$ [95]**

p, 10^7 Па	Температура t, °С									
	0	10	25	40	50	60	70	80	90	100
0	50 885	47 810	45 246	44 240	44 174	44 496	45 161	46 143	47 430	49 018
1	49 479	46 563	44 106	43 113	43 021	43 296	43 891	44 783	45 959	47 413
2	48 122	45 362	43 012	42 037	41 925	42 158	42 693	43 505	44 581	45 916
5	44 313	42 014	39 989	39 091	38 942	39 082	39 476	40 101	40 943	41 991
10	38 745	37 167	35 684	34 969	34 820	34 890	35 155	35 597	36 199	36 943

Таблица 4.9. **Сжимаемость жидких металлов в точке плавления**

Металл	k_S, 10^{-12} Па$^{-1}$	k_T, 10^{-12} Па$^{-1}$	Литература	Металл	k_S, 10^{-12} Па$^{-1}$	k_T, 10^{-12} Па$^{-1}$	Литература
Барий	170	179	[95]	Олово	27,5	—	[96]
Висмут	36,5	—	[96]	Празеодим	40,8	41,7	[67]
Галлий	21,6	—	[96]	Ртуть	9,2	—	[96]
Индий	28,6	—	[96]	Рубидий	421	—	[96]
Иттербий	99,1	116,9	[97]	Свинец	28,8	—	[96]
Кадмий	25,5	—	[96]	Стронций	116	131	[95]
Кальций	82,7	110	[95]	Цезий	573	—	[96]
Лантан	41,0	42,4	[97]	Церий	52,2	53,0	[97]
Магний	38,1	50,6	[95]	Цинк	19,2	—	[96]
Натрий	175	—	[96]				

Таблица 4.10. **Сжимаемость расплавов [99]**

Вещество	T, К	k, 10^{-12} Па$^{-1}$	Вещество	T, К	k, 10^{-12} Па$^{-1}$
Al_2I_6	467	860	$LiClO_4$	529	251
	489	890		561	230
GaI_3 [100]	500	783	$NaNO_2$	573	180
InI_3 [100]	500	596	$NaNO_3$	605	202
I_2	393	452		673	230
	413	527	Na_2S_4	595	171
	443	646	Na_2S_5	595	180
ICl	309	540	$NaClO_3$	538	291
	341	630	$RbNO_3$ [100]	623	203
CdI_2	661	430		686	230
KNO_3 [100]	623	185	AgBr	722	96
	723	257		791	111
KSCN	457	246	AgCl	731	84
	495	265		783	98
$K_2Cr_2O_7$	684	167	CsI	923	650
	741	187		973	690
$LiNO_3$ [100]	573	197	CsCl	944	410
	673	241		1021	484

Таблица 4.11. **Коэффициенты уравнения Тэйта (4.10) и логарифмического уравнения (4.11) для плотных газов [4]**

Вещество	t, °С	p, 10^5 Па	C	B, 10^5 Па	A, см^3
Азот ($p_0 = 3 \cdot 10^8$ Па в уравнении Тэйта; $p_0 = 2 \cdot 10^8$ Па в логарифмическом уравнении)	0	3—12	0,3678	—1200	—
	25			—1326	—
	50			—1420	51,13
	100			—1576	49,45
	200			—1818	47,39
	300			—1970	46,71
	400			—2100	46,16
Аммиак ($p_0 = 1 \cdot 10^8$ Па в уравнении Тэйта и логарифмическом уравнении)	50	1—10	0,3084	673	87,7
	100			142	74,67
	150			—184	66,76
	200			—280	—
Аргон ($p_0 = 3 \cdot 10^8$ Па в уравнении Тэйта; $p_0 = 2 \cdot 10^8$ Па в логарифмическом уравнении)	100	3—10	0,3678	—1610	45,33
	200			—1852	42,16
	400			—2165	39,78
Водород ($p_0 = 3 \cdot 10^8$ Па)	25	3—7	0,4771	—1625	—
	50		0,4804	—1685	—
	100		0,4852	—1766	—
	150		0,4922	—1843	—
Гелий ($p_0 = 3 \cdot 10^8$ Па)	20	3—7	0,4776	—1995	—
	50		0,5101	—1925	—
	100		0,5198	—1965	—
	150		0,5276	—2005	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Статистическая физика. — 2-е изд. М.: Наука. 1964.
2. **Murnaghan F. D.**//Proc. Nat. Acad. Sci. 1944. Vol. 30. P. 244—248.
3. **Birch F.**//J. Geophys. Res. 1952. Vol. 57. P. 227—286.
4. **Циклис Д. С.** Плотные газы. М.: Химия. 1977.
5. **Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.** Свойства жидкостей и газов. — 3-е изд.: Пер. с англ./Под ред. Б. И. Соколова. Л.: Химия. 1982.
6. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Functionen aus Naturwissenschaften und Technik, Neue Serie, Gruppe IV, Bd 4, Eigenschaften der Materie bei hohen Drucken. Berlin, Heidelberg, N. Y.: Springer-Verlag, 1980.
7. **Birch F.**//Handbook of Physical Constants. N. Y.: Geological Soc. Am. 1966. P. 107—173.
8. **Drickamer H. G., Lynch R. W., Clendenen R. L. e. a.**//Solid State Phys. 1966. Vol. 19. P. 135—228.
9. **Андерсон О.**//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ. М.: Мир. 1968. Т. III Ч. Б. Динамика решетки.
10. **Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А.** Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов: Справочник. Киев: Наукова думка. 1982.
11. **Vaidya S. N., Kennedy G. C.**//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. № 10. P. 2329—2345.
12. **Gschneidner K., Jr.**//Solid State Phys., 1964. Vol. 16. P. 275—426.
13. **Anderson M. S., Swenson C. A.**//J. Phys. Chem. Solids. 1975. Vol. 36. № 3. P. 145—162.
14. **Vaidya S. N., Kennedy G. C.**//Ibid. 1972. Vol. 33. № 7. P. 1377—1389.
15. **Anderson M. S., Swenson C. A.**//Phys. Rev. B. 1974. Vol. 10. № 12. P. 5184—5191.
16. **Udovichenko B. G., Manzhelii V. G.**/ J. Low Temp. Phys. 1970. Vol. 3. № 4. P. 429—438.
17. **Reynolds C. L., Jr., Barker R. E., Jr.**//J. Chem. Phys. 1974. Vol. 61. № 7(1). P. 2548—2549.
18. **McSkimin H. J., Jayaraman A., Andreatch P., Jr.**// J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. № 5. P. 2362—2364.
19. **Barsch G. R., Chang Z. P.**//Phys. Stat. Solidi. 1967. Vol. 19. № 1. P. 139—151.
20. **Vaidya S. N., Getting I. C., Kennedy G. C.**//J. Phys. Chem. Solids. 1971. Vol. 32. № 11. P. 2545—2566.
21. **Stewart J. W.**//Ibid. 1968. Vol. 29. № 4. P. 641—651.
22. **Vaidya S. N., Kennedy G. C.**//Ibid. 1971. Vol. 32. № 5. P. 951—964.
23. **Gust W. H., Holt A. C., Royce E. B.**//J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. № 2. P. 550—560.
24. **Champhousen D. L. e. a.**//Phys. Rev. Lett. 1971. Vol. 26. № 4. P. 184—188.
25. **Chang Z. P., Graham E. K.**//J. Phys. Chem. Solids. 1977. Vol. 38. № 12. P. 1355—1362.
26. **Wong C., Shuele D. E.**//Ibid. 1968. Vol. 29. № 8. P. 1309—1330.
27. **Cline C. F., Stephens D. R.**//J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. № 9. P. 2869—2873.
28. **Францевич И. Н., Гнесин Г. Г., Курдюмов А. В.** и др. Сверхтвердые материалы/Под ред. И. Н. Францевича. Киев: Наукова думка. 1980.
29. **Carcia P. F., Barsch G. R.**//Phys. Rev. B. 1973. Vol. 8. № 6. P. 2505—2515.
30. **Carcia P. F., Barsch G. R.**//Phys. Stat. Solidi. B. 1973. Vol. 59. № 2. P. 595—606.
31. **Akgöz Y. C., Farley J. M., Saunders G. A.**//J. Phys. Chem. Solids. 1973. Vol. 34. № 2. P. 141—149.
32. **Holzapfel W., Drickamer H. G.**//J. Chem. Phys. 1968. Vol. 48. № 10. P. 4798—4800.
33. **Brown H. L. e. a.**//Ibid. 1966. Vol. 45. № 2. P. 547—549.
34. **McSkimin H. J., Jayaraman A., Andreatch P., Jr. e. a.**//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 9. P. 4127—4128.
35. **Weil R., Groves W. O.**//Ibid. 1968. Vol. 39. № 9. P. 4049—4051.
36. **Jorgensen J. D.**//Ibid. 1978. Vol. 49. № 11. P. 5473—5478.
37. **Wang H., Simmons G.**//J. Geophys. Res. 1973. Vol. 78. № 8. P. 1262—1273.
38. **Michel D. J.**//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 12. P. 5547—5548.
39. **Jayaraman A. e. a.**//Phys. Rev. B., 1974. Vol. 9. № 6. P. 2513—2520.
40. **Takahashi T. e. a.**//J. Geophys. Res. 1968. Vol. 73. № 14. P. 4717—4725.
41. **Chandrasekhar B. S., Rayne J. A.**//Phys. Rev. 1961. Vol. 124. № 4. P. 1011—1014.
42. **Jayaraman A.**//Rev. Mod. Phys. 1983. Vol. 55. № 1. P. 65—108.
43. **Banus M. D., Lavine M. C.**//High Temp. — High Press. 1969. Vol. 1. № 3. P. 269—273.
44. **Sawaoka A. e. a.**//Japan. J. Appl. Phys. 1974. Vol. 13. № 3. P. 579.
45. **Gerlich D. e. a.**//Phys. Rev. B. 1984. Vol. 29. № 4. P. 2142—2147.
46. **Chattopadhyay T. e. a.**//J. Phys. Chem. Solids. 1983. Vol. 44. № 7. P. 699—700.
47. **Gerlich D., Smith C. S.**//Ibid. 1974. Vol. 35. № 12. P. 1587—1592.
48. **Stephens D. P., Lilley E. M.**//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 1. P. 177—180.
49. **Cheng C. H.**//Phys. Chem. Solids. 1967. Vol. 28. № 3. P. 413—416.
50. **Davis L. C. e. a.**//Ibid. 1967. Vol. 28. № 3. P. 439—447.
51. **Завадский Э. А., Каменев В. И.**//Физика и техника высоких давлений. Киев: Наукова думка. 1980. № 1. С. 29—42.
52. **Manghani M. H. e. a.**//Phys. Stat. Solidi a. 1974. Vol. 25. № 1. P. 69—78.
53. **Soga N. e. a.**//J. Phys. Chem. Solids. 1973. Vol. 34. № 12. P. 2143—2148.
54. **Chattopadhyay T. e. a.**//Ibid. 1982. Vol. 43. № 9. P. 919—923.
55. **Hazen R. M., Finger L. W.**//J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50. № 11. P. 6826—6828.
56. **Wu A. Y.**//Phys. Lett. A. 1977. Vol. 60. № 3. P. 260—262.
57. **Boyle W. F. e. a.**//Phys. Rev. B. 1976. Vol. 14. № 2. P. 526—530.
58. **Peercy P. S. e. a.**//J. Phys. Chem. Solids. 1975. Vol. 36, № 10. P. 1123—1128.
59. **Chang E., Graham E. K.**//J. Geophys. Res. 1975. Vol. 80. № 17. P. 2595—2599.
60. **Mullen M. E. e. a.**//Phys. Rev. B. 1974. Vol. 10. № 1. P. 186—199.
61. **Tosi M. P.**//Solid State Phys. 1964. Vol. 16. P. 1—120.
62. **Lippmann G. e. a.**//Phys. Stat. Solidi a. 1971. Vol. 6. № 2. K159—K161.
63. **Edwards L. R., Lynch R. W.**//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. № 3. P. 573—574.
64. **Lewis G. K. e. a.**//J. Chem. Phys. 1966. Vol. 45. № 2. P. 598—600.
65. **Peercy P. S. e. a.**//J. Phys. Chem. Solids. 1975. Vol. 36. № 10. P. 1105—1122.
66. **Banus M. D., Lavine M.**//High Temp. — High Pres. 1970. Vol. 2. № 6. P. 671—679.
67. **Benjamin T. M. e. a.**//Ann. Rept. Dir. Geophys. Lab. 1980—1981. Washington D. C.: Carnegie Institution, s. a. P. 280—283.
68. **Chattopadhyay T. e. a.**//Phys. Rev. B. 1981. Vol. 23. № 6. P. 2471—2483.

69. **Каменев В. И., Завадский Э. А.**//Физика твердого тела, 1978. Т. 20. № 3. С. 933—935.
70. **Bartholin H., Florence D., Parisot D. e. a.**//Phys. Lett. A., 1977. Vol. 60. № 1. P. 47—49.
71. **Ito T.**//High Pressure Science and Technology. Ed. by K. D. Timmerhaus und M. S. Barber. N. Y., Lond.: Plenum Press. 1979. Vol. 1. P. 482—490.
72. **Vaidya S. N., Kennedy G. C.**//J. Chem. Phys. 1971. Vol. 55. № 3(1). P. 987—992.
73. **Hamamsy M. E., Elnahwy S., Damask A. C. e. a.**// Ibid. 1977. Vol. 67. № 12. P. 5501—5504.
74. **Losty H. H. W.**//Modern Aspects of Graphite Technology/Ed. by L. C. F. Blackman. Lond.: Academ. Press. 1970. P. 204.
75. **Кабалкина С. С.**//Докл. АН СССР. 1959. Т. 125. № 1. С. 114—117.
76. **Кабалкина С. С. и др.**//Там же. 1962. Т. 144. № 5. С. 1019—1021.
77. **Кабалкина С. С., Верещагин Л. Ф.**//Там же. 1960. Т. 134. № 2. С. 330—332.
78. **Morosin B., Schriber J. E.**//Solid Stat. Commun., 1972. Vol. 10. № 3. P. 249—251.
79. **Верещагин Л. Ф., Кабалкина С. С., Троицкая З. В.**//Докл. АН СССР. 1964. Т. 158. № 5. С. 1061—1063.
80. **Кабалкина С. С., Троицкая З. В.**//Там же, 1963. Т. 151. № 5. С. 1068—1070.
81. **Iwata N., Okamoto T.**//Japan. J. Appl. Phys. 1975. Vol. 14. № 2. P. 248—252.
82. **Pace N. G. e. a.**//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. № 7. P. 1467—1476.
83. **Кабалкина С. С., Верещагин Л. Ф.**//Докл. АН СССР. 1962. Т. 143. № 4. С. 818—821.
84. **Верещагин Л. Ф. и др.**//Там же, 1965. Т. 165. № 2. С. 297—298.
85. **Clarke R.**//Solid Stat. Commun, 1978. Vol. 25. № 5. P. 333—336.
86. **Колобянина Т. Н. и др.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1970. Т. 59. № 4(10). С. 1146—1155.
87. **Olinger B., Jamieson J. C.**//High Temp. — High Press. 1973. Vol. 5. № 2. P. 123—131.
88. **Worlton T. G., Cartz L., Niravath A.**//Ibid. 1972. Vol. 4. № 4. P. 463—469.
89. **Handbook** of Chemistry and Physics//37-th ed./Ed. by Ch. D. Hodgman. Clevelend; Ohio: Chem. Rubber Publ. Co. 1955—1956.
90. **Маслениикова В. Я., Нникифорова М. Б.**//Докл. АН СССР. 1983. Т. 273. № 4. С. 871—873.
91. **Техиическая** энциклопедия/Под ред. Л. К. Мартенса. М.: Советская энциклопедия. 1930. Т. 5.
92. **Гайвороиский А. Т., Яковлев Ю. А.**//Физика и техиика высоких давлений. Киев: Наукова Думка. 1982. № 7. С. 69—74.
93. **Кэй Дж., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных: Пер. с англ./Под ред. К. П. Яковлева. М.: Физматгиз, 1962.
94. **Атаиов Ю. А., Борзуиов В. А., Разумихии В. Н.**/ Исследования в области высоких давлений/Под ред. Е. В. Золотых. М.: Изд-во стандартов. 1969. Вып. 104(164). С. 99—102.
95. **Chen C. T., Fine R. A., Millero F. J.**//J. Phys. Chem. 1977. Vol. 66. № 5. P. 2142—2144.
96. **McAlister S. P. e. a.**//Canad. J. Phys. 1974. Vol. 52. № 19. P. 1847—1851.
97. **Вилсои Д. Р.** Структура жидких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1972.
98. **McAlister S. P., Crozier E. D.**//Solid State Commun. 1981. Vol. 40. № 4. P. 375—378.
99. **Cleaver B., Spencer E. D.**//High Temp. — High Press. 1975. Vol. 7. № 5. P. 539—549.
100. **Cleaver B., Zani P.**//Ibid. 1972. Vol. 4. № 4. P. 463—469.

ГЛАВА 5

ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВ

А. П. Бабичев

5.1. ВВЕДЕНИЕ

1. Приведенные значения плотности соответствуют плотности веществ при температуре 20 °С и атмосферном давлении, за исключением тех случаев, когда в скобках указана другая температура.

2. Значения плотности азота, брома, водорода, йода, кислорода, фосфора, фтора и хлора приведены для их естественного молекулярного состояния.

3. Приняты следующие сокращения: ам. — аморфиый, б. — белый; г. — голубой, гекс. — гексагональный, ж. — желтый, ждк. — жидкий, з. — зеленый, к. — коричневый, куб. — кубический, крст. — кристаллический, мон. — моиоклиниый, ор. — оранжевый, ромб. — ромбический, с. — синий, сер. — серый, стекл. — стекловидный, тв. — твердый, триг. — тригональный, трикл. — триклинный, ф. — фиолетовый, ч. — черный, *R* — радиоактивный.

4. В § 5.2 для ряда элементов приведены в круглых скобках приближенные значения атомной массы наиболее стабильного изотопа.

В § 5.3 римскими цифрами в круглых скобках указана — степень окисленности элемента в данном соединении.

5. За более детальными сведениямн рекомендуем обращаться к следующим изданиям: элементы [1, 2], неорганические вещества [3], органические вещества [7], жидкости [12], ртуть и вода при различиой тсмпературе [12], пластмассы, сплавы, минералы, дерево и другие твердые вещества [8, 9, 14].

Продолжение табл. 5.2

Элемент	Атомная масса, а. е. м.	Плотность, 10^3 кг/м^3
$_{7}$N Азот	14,0067	$1{,}2506 \cdot 10^{-3}$
		0,808 (—195.8 °C) ждк.
$_{89}$Ac Актиний	(227)	10,07
$_{13}$Al Алюминий	26,98154	2,6889
$_{95}$Am Америций	(243)	13,67
$_{18}$Ar Аргон	39,948	$1{,}7837 \cdot 10^{-3}$
		1,40 (—186 °C) ждк.
$_{85}$At Астат	(210)	—
$_{56}$Ba Барий	137,33	3,594
$_{4}$Be Бериллий	9,01218	1,848
$_{97}$Bk Берклий	(247)	14,78
$_{5}$B Бор	10,811 [5]	2,34 крст.
		2,37 ам.
$_{35}$Br Бром	79,904	3,119
$_{23}$V Ванадий	50,9415	5,96
$_{83}$Bi Висмут	208,9804	9,78
$_{1}$H Водород	1,00794 [7]	$8{,}988 \cdot 10^{-5}$
		0,0708 (—252,8 °C) ждк.
$_{74}$W Вольфрам	183,85 [3]	19,35
$_{64}$Gd Гадолиний	157,25 [3]	7,895
$_{31}$Ga Галлий	69,723 [4]	5,904 (29,6 °C) тв.
		6,095 (29,8 °C) ждк.
$_{72}$Hf Гафний	178,49 [3]	13,31
$_{2}$He Гелий	4,000602 [2]	$1{,}785 \cdot 10^{-4}$
		0,1221 (—268,9 °C) ждк.
$_{32}$Ge Германий	72,59 [3]	5,323 (25 °C)
$_{67}$Ho Гольмий	164,9304	8,795 (25 °C)
$_{66}$Dy Диспрозий	162,50 [3]	8,550 (25 °C)
$_{63}$Eu Европий	151,96	5,243 (25 °C)
$_{26}$Fe Железо	55,847 [3]	7,874
$_{79}$Au Золото	196,9665	19,32
$_{49}$In Индий	114,82	7,31
$_{53}$I Иод	126,9045	4,93
$_{77}$Ir Иридий	192,22 [3]	22,42 (17 °C)
$_{70}$Yb Иттербий (α-фаза)	173,04 [3]	6,965
$_{39}$Y Иттрий	88,9058	4,469 (25 °C)
$_{48}$Cd Кадмий	112,41	8,65
$_{19}$K Калий	39,0983	0,862
$_{98}$ Cf Калифорний	(251)	—
$_{20}$Ca Кальций	40,078 [4]	1,55
$_{8}$O Кислород	15,9994 [3]	$1{,}429 \cdot 10^{-3}$
		1,14 (—182,9 °C) ждк.
$_{27}$Co Кобальт	58,9332	8,90
$_{14}$Si Кремний	28,0855 [3]	2,33 (25 °C) крст.
		2,0 (25 °C) ам.
$_{36}$Kr Криптон	83,80	$3{,}733 \cdot 10^{-3}$
		2,155 (—153,2 °C) ждк.
$_{54}$Xe Ксенон	131,29 [3]	$5{,}8971 \cdot 10^{-3}$
		3,52 (—109 °C) ждк.
$_{96}$Cm Кюрий	(247)	13,51 расч.
$_{57}$La Лантан	138,9055 [3]	6,145 (25 °C)
$_{3}$Li Литий	6,941 [2]	0,534

Элемент	Атомная масса, а.е.м.	Плотность, 10^3 кг/м^3
$_{71}$Lu Лютеций	174,967	9,840
$_{12}$Mg Магний	24,305	1,738
$_{25}$Mn Марганец (α,β,γ,δ-фазы)	54,9380	7,21—7,44
$_{29}$Cu Медь	63,546 [3]	8,96
$_{101}$Md Менделевий	(258)	—
$_{42}$Mo Молибден	95,94	10,22
$_{33}$As Мышьяк	74,9216	
(с., гекс., α-фаза)		5,73
(ч., ам.)		4,7—5,1
(ж., ромб., γ-фаза)		1,97
$_{11}$Na Натрий	22,98977	0,971
$_{60}$Nd Неодим	144,24 [3]	
(гекс., α-фаза)		7,007
(куб., β-фаза)		6,80
$_{10}$Ne Неон	20,179	$9{,}0035 \cdot 10^{-4}$
		2,205 (—246 °C) ждк.
$_{93}$Np Нептуний	237,0482	20,25
$_{28}$Ni Никель	58,69	8,91
$_{41}$Nb Ниобий	92,9064	8,57
$_{50}$Sn Олово	118,710 [7]	
(с., куб., α-фаза)		5,85
(б., тетр., β-фаза)		7,29
$_{76}$Os Осмий	190,2	22,57
$_{46}$Pd Палладий	106,42	12,02
$_{78}$Pt Платина	195,08 [3]	21,45
$_{94}$Pu Плутоний (α-фаза)	(244)	19,84 (25 °C)
$_{84}$Po Полоний	(209)	
(куб., α-фаза)		9,32
(гекс., β-фаза)		9,4
$_{59}$Pr Празеодим	140,9077	
(гекс., α-фаза)		6,773
(куб., β-фаза)		6,44
$_{61}$Pm Прометий	(145)	7,22 (25 °C)
$_{91}$Pa Протактиний	231,0359	15,37 расч.
$_{88}$Ra Радий	226,0254	5—6
$_{86}$Rn Радон	(222)	$9{,}73 \cdot 10^{-3}$
		4,4 (—62 °C) ждк.
$_{75}$Re Рений	186,207	21,02
$_{45}$Rh Родий	102,9055	12,41
$_{80}$Hg Ртуть	200.59 [3]	13,5461 ждк.
		14,193 (—38,9 °C) тв.
$_{37}$Rb Рубидий	85,4678 [3]	1,532
$_{44}$Ru Рутений	101,07 [2]	12.41
$_{62}$Sm Самарий	150,36 [3]	
(гекс., α-фаза)		7,536
(куб., β-фаза)		7,40
$_{82}$Pb Свинец	207,2	11,336

Продолжение табл. 5.2

Элемент	Атомная масса, а.е.м.	Плотность, 10^3 кг/м^3
$_{34}$Se Селен	78,96 [3]	
(ч., стекл.)		4,28
(к., мон., β-фаза)		4,46
(с., гекс., α-фаза)		4,79
(ам.)		4,82
$_{16}$S Сера	32,066 [6]	
(ж., ам., γ-фаза)		1,92
(ж., мон., β-фаза)		1,96
(ж., ромб., α-фаза)		2,07
$_{47}$Ag Серебро	107,8682 [3]	10,50
$_{21}$Sc Скандий	44,95591 [1]	2,989 (25° C)
$_{38}$Sr Стронций	87,62	
(куб., α-фаза)		2,63
$_{51}$Sb Сурьма	121,75 [3]	6,691
$_{81}$Tl Таллий	204,383	
(гекс., α-фаза)		11,85
$_{73}$Ta Тантал	180,9479	16,654
$_{52}$Te Теллур	127,60 [3]	6,24 крст.
		6,00 ам.
$_{65}$Tb Тербий	158,9254	8,272
$_{43}$Tc Технеций	98,9062	11,49
$_{22}$Ti Титан	47,88 [3]	
(гекс., α-фаза)		4,505
$_{90}$Th Торий	232,0381	11,72
$_{69}$Tm Тулий	168,9342	9,321 (25 °C)
$_{6}$C Углерод		
(графит)		1,8—2,1 ам.
		1,9—2,3
(алмаз)		3,15—3,53
$_{92}$U Уран (ромб., α-фаза)	238,0289	19,040
$_{100}$Fm Фермий	(257)	—
$_{15}$P Фосфор	30,97376	
(б., куб.)		1,82
(к., трикл.)		2,0—2,4
(ч., ромб.)		2,25—2,69
$_{87}$Fr Франций	(223)	—
$_{9}$F Фтор	18,998403	$1{,}696 \cdot 10^{-3}$
$_{17}$Cl Хлор	35,453	$3{,}214 \cdot 10^{-3}$
		1,557 (—35 °C) ждк.
$_{24}$Cr Хром	51,9961 [6]	7,18—7,20
$_{55}$Cs Цезий	132,9054	1,873
$_{58}$Ce Церий (гекс., γ-фаза)	140,12	6,77
$_{30}$Zn Цинк	65,39 [2]	7,133
$_{40}$Zr Цирконий (гекс., α-фаза)	91,224 [2]	6,45
$_{99}$Es Эйнштейний	(254)	—
$_{68}$Er Эрбий	167,26 [3]	9,066 (25 °C)

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
Азот		
(I) оксид	N_2O	$1{,}978 \cdot 10^{-3}$
(II) оксид	NO	$1{,}340 \cdot 10^{-3}$
(III) оксид	N_2O_3	1,45 (2° C)
(IV) оксид	NO_2	1,49 (0° C) ждк.
(V) оксид	N_2O_5	1,64
ди-, сульфид, тетра-	N_2S_4	1,90
тетра-, сульфид, тетра-	N_4S_4	2,22 (15° C)
фторид	NF_3	1,54 (—129° C) ждк.
хлорид	NCl_3	1,653
Азотистоводородная кислота	HN_3	1,09
Азотная кислота	HNO_3	1,513
Аммиак	NH_3	$0{,}771 \cdot 10^{-3}$
Гидразин	N_2H_4	1,01
Нитрил фторид	NO_2F	$2{,}90 \cdot 10^{-3}$
Нитрил хлорид	NO_2Cl	$2{,}57 \cdot 10^{-3}$
Алюминий		
борид, ди-	AlB_2	3,19
бромид	$AlBr_3$	3,01 (25° C)
гидроксид	$Al(OH)_3$	2,42
гидроксид оксид	AlO(OH)	3,01
иодид	AlI_3	3,95
карбид	Al_4C_3	2,36
нитрат	$Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	1,72
нитрид	AlN	3,13
оксид (корунд)	Al_2O_3	3,97
сульфат	$Al_2(SO_4)_3$	2,71
сульфид	Al_2S_3	2,02 (13° C)
фосфат, орто-	$AlPO_4$	2,57
фторид	AlF_3	3,07
хлорид	$AlCl_3$	2,44 (25° C)
Америций		
(IV)оксид	AmO_2	11,7
Аммоний		
амид	NH_4N_3	1,346
бромид	NH_4Br	2,40
иодат	NH_4IO_3	3,31
иодид	NH_4I	2,51
нитрат	NH_4NO_3	1,725
нитрит	NH_4NO_2	1,69
сульфат	$(NH_4)_2SO_4$	1,77
сульфид, гидро-	$(NH_4)HS$	1,17
фосфат, гидро-	$(NH_4)_2HPO_4$	1,62
фторид	NH_4F	1,015
хлорат	NH_4ClO_3	1,80
хлорид	NH_4Cl	1,53
Барий		
азид	$Ba(N_3)_2$	2,936
борид, гекса-	BaB_6	4,36 (16° C)
бромид	$BaBr_2$	4,781 (24° C)
гидрид	BaH_2	4,21
иодат	$Ba(IO_3)_2$	5,00
иодид	BaI_2	4,92
карбид, ди-	BaC_2	3,75
карбонат (γ-фаза)	$BaCO_3$	4,43

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м³
нитрат	$Ba(NO_3)_2$	3,24
нитрид	Ba_3N_2	4,78 (25° С)
оксид	BaO	5,72
пероксид	BaO_2	4,96
сульфат	$BaSO_4$	4,50 (15° С)
сульфид	BaS	4,25 (15° С)
фторид	BaF_2	4,83
хлорид	$BaCl_2$	3,92
Бериллий		
бромид	$BeBr_2$	3,47
гидроксид	$Be(OH)_2$	1,909
иодид	BeI_2	4,33 (25° С)
карбид	Be_2C	1,90 (15° С)
нитрат	$Be(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	1,56
нитрид	Be_3N_2	2,71
оксид	BeO	3,01
сульфат	$BeSO_4$	2,44
сульфид	BeS	2,36
фторид	BeF_2	1,99 (25° С)
хлорид	$BeCl_2$	1,90 (25° С)
Бор		
бромид	BBr_3	2,65
иодид	BI_3	3,35 (50° С)
тетра-, карбид	B_4C	2,52
нитрид	BN	2,34
оксид	B_2O_3	1,844 крст.
ди-, сульфид, три-	B_2S_3	1,55
фторид	BF_3	$2,99 \cdot 10^{-3}$
хлорид	BCl_3	1,434 (0° С)
Борная кислота, мета-	HBO_2	2,49
Бориая кислота, орто-	H_3BO_3	1,435 (15° С)
Гексаборан	B_6H_{10}	0,69 (0° С)
Декаборан	$B_{10}H_{14}$	0,94 (25° С)
Диборан	B_2H_6	0,447 (—112° С) ждк.
Пентаборан	B_5H_9	0,66 (0° С)
Тетраборан	B_4H_{10}	0,56 (—35° С) ждк.
Бром		
фторид, три-	BrF_3	2,49
фторид, пента-	BrF_5	2,47 (25° С) ждк.
Бромоводород	HBr	$3,645 \cdot 10^{-3}$
Ванадий		
борид	VB_2	5,10
бромид	VBr_3	4,00
иодид	VI_2	5,44
карбид	VC	5,77
нитрид	VN	6,13
(II) оксид	VO	5,76
(III) оксид	V_2O_3	4,87
(IV) оксид	VO_2	4,34
(V) оксид	V_2O_5	3,36
оксид фторид, три-	VF_3O	2,46 (19° С)
оксид хлорид, трн-	VCl_3O	1,83
(II) сульфид	VS	4,20
(III) сульфид	V_2S_3	4,72
(V) сульфид	V_2S_5	3,0

Продолжение табл.5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м³
(III) фторид	VF_3	3,36
(IV) фторид	VF_4	2,975
(V) фторид	VF_5	2,18
(II) хлорид	VCl_2	3,23
(III) хлорид	VCl_3	3,00
(IV) хлорид	VCl_4	1,87
Висмут		
(III) бромид	$BiBr_3$	5,60
гидроксид	$Bi(OH)_3$	4,36
(III) иодид	BiI_3	5,64
иодид оксид	$BiIO$	7,92
(II) оксид	BiO	7,15—7,30
(III) оксид	Bi_2O_3	8,9
(III, V) оксид	$Bi_2O_4 \cdot 2H_2O$	5,6
(V) оксид	Bi_2O_5	5,10
оксид фторид	$BiFO$	7,5
оксид хлорид	$BiClO$	7,72 (15° С)
сульфат	$Bi_2(SO_4)_3$	5,08 (15° С)
(II) сульфид	BiS	~7,7
(III) сульфид	Bi_2S_3	7,6
фосфат, орто-	$BiPO_4$	6,32 (15° С)
(III) фторид	BiF_3	8,75
(III хлорид	$BiCl_3$	4,75
Висмутовая кислота	$Bi_2O_5 \cdot nH_2O$	5,75
Водород		
бромид	HBr	2,16 (—68° С)
иодид	HI	2,80 (—35° С)
селенид	H_2Se	2,12 (—42° С)
сульфид	H_2S	0,96 (—60° С)
теллурид	H_2Te	2,57 (—20° С)
фторид	HF	0,991 (19,4° С)
хлорид	HCl	1,19 (—85°)
Вода	H_2O	1,0000 (4° С)
Вода тяжелая	D_2O	1,104
Пероксид водорода (перекись водорода)	H_2O_2	1,442
Вольфрам		
борид	W_2B	17,7
борид, ди-	WB_2	10,77
(VI) бромид	WBr_6	6,9
(II) иодид	WI_2	6,9
(IV) иодид	WI_4	5,2 (18° С)
Карбид	WC	15,7
ди-, карбид	W_2C	16,06—17,3
карбонил, гекса	$W(CO)_6$	2,65
(IV) оксид	WO_2	12,11
(VI) оксид	WO_3	7,16
силицид, ди-	WSi_2	9,4
сульфид, ди-	WS_2	7,5 (10° С)
(VI) фторид	WF_6	3,44 (15° С) ждк.
(V) хлорид	WCl_5	3,875
(VI) хлорид	WCl_6	3,52
Вольфрамовая кислота	H_2WO_4	5,5
Гадолиний		
бромид	$GdBr_3$	4,57
иодид	GdI_3	3,14
нитрат	$Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	2,33

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
оксид	Gd_2O_3	7,41 (15° С)
сульфат	$Gd(SO_4)_3$	4,14
сульфид	Gd_2S_3	6,15
фторид	GdF_3	7,05
хлорид	$GdCl_3$	4,52 (0° С)
Галлий		
(III) арсенид	GaAs	5,35
(III) бромид	$GaBr_3$	3,69 (25° С)
(III) иодид	GaI_3	4,15 (25° С)
(I) оксид	Ga_2O	4,77 (25° С)
(III) оксид	Ga_2O_3	
(α-фаза)		5,88
(β-фаза)		6,48
(I) сульфид	Ga_2S	4,2
(III) сульфид	Ga_2S_3	3,65 (25° С)
(III) фторид	GaF_3	4,47
(III) хлорид	$GaCl_3$	2,47 (25° С)
Гафний		
карбид	HfC	12,7
иитрид	HfN	13,9
оксид	HfO_2	9,68
сульфид	HfS_2	6,0
Германий		
(IV) бромид	$GeBr_4$	3,13 (29° С)
(II) иодид	GeI_2	5,37
(IV) иодид	GeI_4	4,32 (25° С)
(IV) нитрид	Ge_3N_4	5,25 (25° С)
(II) оксид	GeO	1,83
(IV) оксид	GeO_2	
(α-фаза)		6,239
(β-фаза)		4,703
(II) сульфид	GeS	4,01
(IV) сульфид	GeS_2	2,94 (14° С)
(IV) фторид	GeF_4	$6,65 \cdot 10^{-3}$
(IV) хлорид	$GeCl_4$	1,87 (25° С)
Герман	GeH_4	$3,42 \cdot 10^{-3}$
Дигерман	Ge_2H_6	1,98 (—100° С)
Тригерман	Ge_3H_8	2,2
Гольмий		
(III) бромид	$HoBr_3$	4,86
(III) иодид	HoI_3	3,24
оксид	Ho_2O_3	8,35
фторид	HoF_3	7,83
Диспрозий		
бромид	$DyBr_3$	4,78
иодид	DyI_3	3,21
оксид	Dy_2O_3	7,81 (27° С)
фторид	DyF_3	7,46
хлорид	$DyCl_3$	3,67 (0° С)
Европий		
(III) бромид	$EuBr_3$	5,40
(II) иодид	EuI_2	5,50
(II) сульфат	$EuSO_4$	4,99
(III) оксид	Eu_2O_3	7,42
(II) фторид	EuF_2	6,50
(III) фторид	EuF_3	6,79
(III) хлорид	$EuCl_3$	4,89

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
Железо		
арсенид	FeAs	7,83
борид	FeB	7,15
(II) бромид	$FeBr_2$	4,64
(II) гидроксид	$Fe(OH)_2$	3,4
(III) гидроксид	$Fe(OH)_3$	3,9
(II) иодид	FeI_2	5,31
три-, карбид	Fe_3C	7,4—7,67
(II) карбонат	$FeCO_3$	3,8—3,9
карбонил, пента-	$Fe(CO)_5$	1,457
карбонил, тетра-	$Fe(CO)_4$	2,00 (18° С)
(III) нитрат	$Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	1,68
ди-, нитрид	Fe_2N	6,35
(II) оксид	FeO	5,7
(II, III) оксид (магнетит)	Fe_3O_4	5,18
(III) оксид (гематит)	Fe_2O_3	5,25
силицид	FeSi	6,1
(II) сульфат (железный купорос)	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	1,90 (18° С)
(III) сульфат	$Fe_2(SO_4)_3$	3,10
(II) сульфид	FeS	4,76
(III) сульфид	Fe_2S_3	4,3
сульфид, ди-	FeS_2	5,03
(α-фаза)		
фосфид	Fe_2P	6,56
(II) фторид	FeF_2	4,09 (25° С)
(III) фторид	FeF_3	3,87
(II) хлорид	$FeCl_2$	2,98
(III) хлорид	$FeCl_3$	2,90 (25° С)
Золото		
(I) бромид	AuBr	7,90
(I) иодид	AuI	8,25
(III) сульфид	Au_2S_3	8,75
(I) хлорид	AuCl	7,4
(III) хлорид	$AuCl_3$	3,9
Индий		
(I) бромид	InBr	4,98
(III) бромид	$InBr_3$	4,75
(I) иодид	InI	5,31
(III) иодид	InI_3	4,69
(I) оксид	InO_2	6,99 (25° С)
(III) оксид	In_2O_3	7,18
(III) сульфат	$In_2(SO_4)_3$	3,44
(I) сульфид	In_2S	5,87 (25° С)
(III) сульфид	In_2S_3	4,90
(III) фторид	InF_3	4,39 (25° С)
(I) хлорид	InCl	4,19
(III) хлорид	$InCl_3$	3,45
Йод		
(I) бромид	IBr	4,42 (0° С)
(IV) оксид	IO_2 или I_2O_4	4,2
(V) оксид	I_2O_5	4,80
фторид, пента-	IF_5	3,5 ждк.
фторид, гепта	IF_7	2,8 (6° С) ждк.
хлорид	ICl	
(α-фаза)		3,18 (0° С)
(β-фаза)		3,24 (34° С) ждк.

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
хлорид, три-	ICl_3	3,19
Иодноватая кислота	HIO_3	4,63 (0° С)
Иодоводород	HI	$5{,}789 \cdot 10^{-3}$
Иридий		
(IV) оксид	IrO_2	3,15
(IV) сульфид	IrS_2	8,43 (25° С)
(VI) фторид	IrF_6	6,0
(III) хлорид	$IrCl_3$	5,30
Иттербий		
(II) бромид	$YbBr_2$	5,91 (25° С)
(III) бромид	$YbBr_3$	5,10
(II) иодид	YbI_2	5,40 (25° С)
(III) иодид	YbI_3	3,33
(III) оксид	Yb_2O_3	9,17
(III) сульфат	$Yb_2(SO_4)_3$	3,79
(III) фторид	YbF_3	8,17
(II) хлорид	$YbCl_2$	5,08
Иттрий		
бромид	YBr_3	3,95
карбид	YC_2	4,13
нитрат	$Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	2,68
оксид (α-фаза)	Y_2O_3	4,84
сульфат	$Y_2(SO_4)_3$	2,61
фторид	YF_3	4,01
хлорид	YCl_3	2,8
Кадмий		
бромид	$CdBr_2$	5,19
гидроксид	$Cd(OH)_2$	4,79 (15° С)
иодид	CdI_2	5,67 (30°)
карбонат	$CdCO_3$	4,26 (4° С)
нитрат	$Cd(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	2,45 (17° С)
(II) оксид	CdO	8,15
селенид	CdSe	5,81 (15° С)
силикат, мета-	$CdSiO_3$	4,93
сульфат	$CdSO_4$	4,69
сульфид	CdS	4,82
теллурид	CdTe	6,20 (15° С)
фторид	CdF_2	6,64
хлорид	$CdCl_2$	4,047
Калий		
азид	KN_3	2,04
бромат	$KBrO_3$	3,24
бромид	KBr	2,76
гидрид	KH	1,47
гидроксид	KOH	2,04
иодат	KIO_3	3,89
иодид	KI	3,12
карбонат (поташ)	K_2CO_3	2,43
нитрат (индийская селитра)	KNO_3	2,11 (16° С)
оксид	K_2O	2,32 (0° С)
периодат	KIO_4	3,62
перманганат	$KMnO_4$	2,70
пероксид	K_2O_2	2,18
перхлорат	$KClO_4$	2,52
селенид	K_2Se	2,85 (15° С)
сульфат	K_2SO_4	2,66

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
сульфат, гидро-	$KHSO_4$	2,32
сульфид	K_2S	1,81 (14° С)
супероксид	KO_2	2,14
теллурид	K_2Te	2,51
фосфат, орто-	K_3PO_4	2,26
фторид	KF	2,48
фторид, гидро-	KHF_2	2,37
хлорат	$KClO_3$	2,32
хлорид	KCl	1,99
цианид	KCN	1,56
Кальций		
борид, гекса-	CaB_6	2,3
бромат	$Ca(BrO_3)_2 \cdot H_2O$	3,33
бромид	$CaBr_2$	3,35 (25° С)
гидрид (α-фаза)	CaH_2	1,7
гидроксид	$Ca(OH)_2$	2,24
иодид	CaI_2	3,96 (25° С)
карбид	CaC_2	2,22
карбонат (аргонит)	$CaCO_3$	2,93
карбонат (кальцит)	$CaCO_3$	2,71 (25° С)
нитрат	$Ca(NO_3)_2$	2,36
нитрид	Ca_3N_2	2,63 (17° С)
оксалат	CaC_2O_4	2,2 (4° С)
оксид	CaO	3,37
селенид	CaSe	3,57
силикат, мета- (волластонит)	$CaSiO_3$	
(α-фаза)		2,5
(β-фаза)		2,90
сульфат (ангидрит, α-фаза)	$CaSO_4$	2,90—2,99
сульфат (гипс)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2,32
сульфид (ольдгамит)	CaS	2,18 (15° С)
теллурид	CaTe	4,87
фосфат, мета-	$Ca(PO_3)_2$	2,82
фосфат, орто- (витлоктит, α-фаза)	$Ca_3(PO_4)_2$	3,14
фосфид	Ca_3P_2	2,51
фторид (флюорит, α-фаза)	CaF_2	3,18
хлорид (гидрофилит)	$CaCl_2$	2,51 (25° С)
Кислород		
Озон	O_3	$2{,}144 \cdot 10^{-3}$
Кислород фторид	OF_2	1,90 (—223,8° С) ждк.
Кобальт		
(II) бромид	$CoBr_2$	4,91 (25° С)
(II) гидроксид	$Co(OH)_2$	3,60 (15° С)
иодат	$Co(IO_3)_2$	5,01
иодид	CoI_2	
(α-фаза)		5,68
(β-фаза)		5,45
карбонат	$CoCO_3$	4,13
нитрат	$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	1,87—2,13
(II) оксид	CoO	5,7
(II, III) оксид	Co_3O_4	6,07
(III) оксид	Co_2O_3	5,18

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
(II) селенид	$CoSe$	7,65
силикат, орто-	$CoSiO_4$	4,63
сульфат	$CoSO_4$	3,71 (25° C)
(II) сульфид	CoS	5,45
(III) сульфид	Co_2S_3	4,8
сульфид, ди-	CoS_2	4,27
три-, сульфид, тетра-	Co_3S_4	4,86
фосфид	Co_2P	6,4 (16° C)
(II) фторид	CoF_2	4,46 (25° C)
(III) фторид	CoF_3	3,88
(II) хлорид	$CoCl_2$	3,36
(III) хлорид	$CoCl_3$	2,94
Кремний		
(III) борид	SiB_3	2,52
(IV) бромид	$SiBr_4$	2,77
карбид	SiC	3,22
иодид	SiI_4	4,2
нитрид	Si_3N_4	3,44
(II) оксид	SiO	2,13
(IV) оксид (кварц)	SiO_2	2,65
(IV) оксид (кристобалит)	SiO_2	2,32
(IV) оксид (тридимит)	SiO_2	2,26
сульфид	SiS_2	2,02
фторид	SiF_4	$4{,}684 \cdot 10^{-3}$
хлорид	$SiCl_4$	1,48
Кремниевая кислота	H_2SiO_3	3,17
Ксенон		
(VI) оксид	XeO_3	4,6
(II) фторид	XeF_2	4,32
(IV) фторид	XeF_4	4,04
(VI) фторид	XeF_6	3,6
Кюрий		
(III) бромид	$CmBr_3$	6,87
(III) иодид	CmI_3	6,37
(III) фторид	CmF_3	9,70
(IV) фторид	CmF_4	7,49
(III) хлорид	$CmCl_3$	5,81
Лантан		
борид	LaB_6	2,61
бромид	$LaBr_3$	5,07
гидрид	LaH_3	5,83
иодид	LaI_3	5,63
карбид	LaC_2	5,02
оксид	La_2O_3	6,51 (15° C)
сульфат	$La_2(SO_4)_3$	3,60 (15° C)
сульфид	La_2S_3	4,91 (11° C)
фторид	LaF_3	5,94
хлорид	$LaCl_3$	3,84
Литий		
арсенат, орто-	Li_3AsO_4	3,07 (15° C)
борат, мета-	$LiBO_2$	1,40 (42° C)

Продолжение табл.5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
бромид	$LiBr$	3,46
гидрид	LiH	0,78 (25° C)
гидроксид	$LiOH$	1,46 (25° C)
иодид	LiI	4,06
карбонат	Li_2CO_3	2,11 (0° C)
нитрат	$LiNO_3$	2,36
оксид	Li_2O	2,01 (25° C)
пероксид	Li_2O_2	2,36
перхлорат	$LiClO_4$	2,43
силикат, мета-	Li_2SiO_3	2,52 (25° C)
силикат, орто-	Li_4SiO_4	2,39 (25° C)
сульфат	Li_2SO_4	2,22
сульфид	Li_2S	1,66
фосфат, орто-	Li_3PO_4	2,54
фторид	LiF	2,63
хлорат	$LiClO_3$	1,12
хлорид	$LiCl$	2,07 (25° C)
Лютеций		
бромид	$LuBr_3$	5,17
оксид	Lu_2O_3	9,42
иодид	LuI_3	3,39
фторид	LuF_3	8,33
хлорид	$LuCl_3$	3,98
Магний		
арсенид	Mg_3As_2	3,15 (25° C)
борат, орто-	$Mg_3(BO_3)_2$	2,99
бромид	$MgBr_2$	3,72 (25° C)
гидроксид (брусит)	$Mg(OH)_2$	2,35–2,46
иодат	$Mg(IO_3)_2 \cdot 4H_2O$	3,3
иодид	MgI_2	4,43 (25° C)
карбонат (магнезит)	$MgCO_3$	2,96
нитрат	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	1,464
нитрид	Mg_3N_2	2,71 (25° C)
оксид (периклаз)	MgO	3,58 (25° C)
силикат, мета-	$MgSiO_3$	3,18
силикат, орто- (форстерит)	Mg_2SiO_4	3,21
силицид	Mg_2Si	1,94
сульфат	$MgSO_4$	2,66
сульфид	MgS	2,84
теллурид	$MgTe$	3,86
фосфат, ди-	$Mg_2P_2O_7$	2,559
фосфид	Mg_3P_2	2,05
фторид	MgF_2	3,13
хлорид	$MgCl_2$	2,32
Марганец		
арсенид	$MnAs$	6,18
борид	MnB	6,2
борид, ди-	MnB_2	6,9
бромид	$MnBr_2$	4,38
гидроксид	$Mn(OH)_2$	3,26
иодид	MnI_2	5,0
три-, карбид	Mn_3C	6,89 (17° C)
карбонат	$MnCO_3$	3,12
(II) оксид	MnO	5,44
(III) оксид (браунит)	Mn_2O_3	4,50

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
(II, III) оксид (α-фаза)	Mn_3O_4	4,72
(IV) оксид (β-фаза)	MnO_2	5,03
(VII) оксид	Mn_2O_7	2,40
селенид	MnSe	5,55 (15 °C)
силикат, мета-	$MnSiO_3$	3,72 (25 °C)
силицид	MnSi	5,90 (15 °C)
силицид, ди-	$MnSi_2$	5,24 (13 °C)
ди-,силицид	Mn_2Si	6,20 (15 °C)
(II) сульфат	$MnSO_4$	3,25
сульфид (α-фаза)	MnS	3,99
фосфат, орто-	$Mn_3(PO_4)_2 \cdot 3H_2O$	3,102
фосфат, ди-	$Mn_2P_2O_7$	3,707 (25 °C)
фосфид	MnP	5,39
(II) фторид	MnF_2	3,98
(II) хлорид	$MnCl_2$	2,98 (25 °C)
Медь		
(I) арсенид	Cu_3As	8,0
борид	Cu_3B_2	8,116
(I) бромид (α-фаза)	CuBr	4,72 (25 °C)
(II) бромид	$CuBr_2$	4,77 (25 °C)
гидрид	CuH	5,30
(II) гидроксид	$Cu(OH)_2$	3,37
(II) иодат	$Cu(IO_3)_2$	5,24 (15 °C)
(I) иодид	CuI	5,65
(I) карбид	Cu_2CO_3	4,40
(II) нитрат	$Cu(NO_3)_2 \times 3H_2O$	2,32
(I) нитрид	Cu_3N	5,84 (25 °C)
(I) оксид	Cu_2O	6,0
(II) оксид	CuO	6,45
(I) селенид	Cu_2Se	6,75 (30 °C)
(II) селенид	CuSe	5,99
силицид	Cu_4Si	7,53
(II) сульфат	$CuSO_4$	3,60
(II) сульфат (медный купорос)	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	2,28
(I) сульфид (медный блеск) (α-фаза)	Cu_2S	5,5—5,8
(II) сульфид (ковеллин)	CuS	4,68
(I) тиоцианат	CuSCN	2,84
(II) фторид	CuF_2	4,23
(I) хлорид (α-фаза)	CuCl	3,7
(II) хлорид	$CuCl_2$	3,05
(II) хлорид	$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	2,38
(I) цианид	CuCN	2,92
Молибден		
борид	MoB	8,65
борид, ди-	MoB_2	7,12
ди-, борид	Mo_2B	9,26
бромид	$MoBr_2$	4,88 (17,5 °C)
(II) иодид	MoI_2	5,28 (25 °C)
(IV) карбид	MoC	8,40
ди-, карбид (α-фаза)	Mo_2C	8,9
карбонил, гекса-	$Mo(CO)_6$	1,96
(IV) оксид	MoO_2	6,47
(VI) оксид)	MoO_3	4,69

Продолжение табл. 5.3

Названне	Формула	Плотность. 10^3 кг/м^3
оксид фторид, тетра-	MoF_4O	3,00 (25 °C)
оксид, ди-, фторид, ди-	MoF_2O_2	3,49 (25 °C)
силицид, ди-	$MoSi_2$	6,31
(IV) сульфид	MoS_2	4,80
ди-, сульфид, три-	Mo_2S_3	5,91 (15 °C)
(VI) фторид	MoF_6	2,55 (17,6 °C) ждк.
(II) хлорид	$MoCl_2$	3,71 (25 °C)
(III) хлорид	$MoCl_3$	3,58 (25 °C)
(V) хлорид	$MoCl_5$	2,93 (25 °C)
Молибденовая кислота	H_2MoO_4	3,11
Мышьяк		
(III) бромид	$AsBr_3$	3,54 (25 °C)
(III) иодид	AsI_3	4,39 (13 °C)
(V) иодид	AsI_5	3,93
(III) оксид	As_2O_3	3,74
(V) оксид	As_2O_5	4,09
(II) сульфид	As_2S_2	3,20
(III) сульфид	As_2S_3	3,43
(III) селенид	As_2Se_3	4,75
(III) фторид	AsF_3	2,67 ждк.
(V) фторид	AsF_5	$7{,}71 \cdot 10^{-3}$
(III) хлорид	$AsCl_3$	2,16 ждк.
Арсин (мышьяковистый водород)	AsH_3	$3.502 \cdot 10^{-5}$
Мышьяковая кислота, орто-	$H_3AsO_4 \cdot {}^1/_2H_2O$	2,0—2,5
Натрий		
азид	NaN_3	1,85
арсенат, мета-	$NaAsO_3$	2,30
ацетат	$NaCH_3COO$	1,53
борат, мета-	$NaBO_2$	2,46
борат, тетра-	$Na_2B_4O_7$	2,37
бромат	$NaBrO_3$	3,34 (17,5 °C)
бромид	NaBr	3,21
гидрид	NaH	1,38
гидроборат, тетра-	$Na(BH_4)$	1,07
гидроксид (α-фаза)	NaOH	2,13
иодат	$NaIO_3$	4,40
иодид	NaI	3,665 (4 °C)
карбид	Na_2C_2	1,58 (15 °C)
карбонат	Na_2CO_3	2,53
карбонат, гидро-	$NaHCO_3$	2,16
нитрат	$NaNO_3$	2,26
нитрид	$NaNO_2$	2,17 (0 °C)
оксид	Na_2O	2,27
периодат	$NaIO_4$	4,17
пероксид	Na_2O_2	2,60
перхлорат	$NaClO_4$	2,50
селенат	Na_2SeO_4	3,21 (17 °C)
селенид	Na_2Se	2,63 (10 °C)
силикат, мета-	Na_2SiO_3	2,4
сульфат	Na_2SO_4	2,70
сульфат (глауберова соль)	$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	1,46
сульфат, гидро-	$NaHSO_4$	2,74
сульфат, ди- (пиросульфат)	$Na_2S_2O_7$	2,66 (25 °C)
сульфид	Na_2S	1,86 (14 °C)
сульфит	Na_2SO_3	2,63 (15 °C)

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
теллурид	Na_2Te	2,90
фосфат, мета-	$NaPO_3$	2,48
фосфат, орто-	Na_3PO_4	2,54
фторид	NaF	2,79
хлорат	$NaClO_3$	2,49 (15° С)
хлорид	NaCl	2,165 (25° С)
цианат	NaOCN	1,94
цианид	NaCN	1,60
Неодим		
бромид	$NdBr_3$	5,35
иодид	NdI_3	2,34
карбид, ди-	NdC_2	5,15
оксид	Nd_2O_3	7,24
сульфат	$Nd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$	2,85
сульфид	Nd_2S_3	5,18 (11° С)
хлорид	$NdCl_3$	4,17
Нептуний		
азид	NpN	14,19
(III) бромид	$NpBr_3$	6,62
(III) иодид	NpI_3	6,82
(II) оксид	NpO	13,35
(IV) оксид	NpO_2	11,1
сульфид	Np_2S_3	8,9
(III) фторид	NpF_3	9,12
(IV) фторид	NpF_4	6,8
(VI) фторид	NpF_6	5,0
(III) хлорид	$NpCl_3$	5,58
(IV) хлорид	$NpCl_4$	4,95
Никель		
антимонид	NiSb	7,54
арсенид	NiAs	7,57 (0° С)
борид	NiB	7,39
бромид	$NiBr_2$	4,64
гидроксид	$Ni(OH)_2$	4,15
иодат	$Ni(IO_3)_2$	5,07
иодид	NiI_2	5,83
карбонил, тетра-	$Ni(CO)_4$	1,32
нитрат	$Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	2,05
оксид	NiO	7,45
селенид	NiSe	8,46
силицид	Ni_2Si	7,2 (17°С)
сульфат	$NiSO_4$	3,68
сульфид	NiS	5,3—5,65
фосфид	Ni_2P	6,31 (15°С)
фторид	NiF_2	4,63
хлорид	$NiCl_2$	3,55
Ниобий		
борид, ди-	NbB_2	6,97
(V) бромид	$NbBr_5$	4,44
(V) иодид	NbI_5	5,11
карбид	NbC	7,74—8,2
нитрид	NbN	8,40
(II) оксид	NbO	7,26
(IV) оксид	NbO_2	5,9
(V) оксид	Nb_2O_5	4,95
(V) фторид	NbF_5	3,29
(V) хлорид	$NbCl_5$	2,75

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
Олово		
(II) бромид	$SnBr_2$	5,18 (17° С)
(IV) бромид	$SnBr_4$	3,34 (35° С) ждк.
(II) иодид	SnI_2	5,28 (25° С)
(IV) иодид	SnI_4	4,47 (0° С)
(II) оксид	SnO	6,45 (0° С)
(IV) оксид (касситерит) (α-фаза)	SnO_2	6,95
(II) сульфид	SnS	5,08 (0° С)
(IV) сульфид	SnS_2	4,51
(II) теллурид	SnTe	6,48
(IV) фторид	SnF_4	4,78
(II) хлорид	$SnCl_2$	3,95 (25° С)
(IV) хлорид	$SnCl_4$	2,23 ждк.
Осмий		
(IV) оксид	OsO_2	7,91
(VIII) оксид	OsO_4	4,91 (22° С)
(IV) сульфид	OsS_2	9,47
(VIII) фторид	OsF_8	3,87
Палладий		
бромид	$PdBr_2$	5,17 (16° С)
гидрид	PdH_2	10,76
иодид	PdI_2	6,00
оксид	PdO	8,31
сульфид	PdS	6,60 (25° С)
(II) фторид	PdF_2	5,80
(III) фторид	PdF_3	5,06
(II) хлорид	$PdCl_2$	4,08
Платина		
арсенид, ди-	$PtAs_2$	11,8
(II) бромид	$PtBr_2$	6,65 (25° С)
(IV) бромид	$PtBr_4$	5,69 (25° С)
(II) иодид	PtI_2	6,40 (25° С)
(III) иодид	PtI_3	7,41 (25° С)
(IV) иодид	PtI_4	6,06 (25° С)
(II) оксид	PtO	14,9
(IV) оксид	PtO_2	10,2
сульфид	PtS	10,04 (25° С)
сульфид, ди-	PtS_2	7,66 (25° С)
(III) сульфид	Pt_2S_3	5,52
фосфид, ди-	PtP_2	9,01 (25° С)
(II) хлорид	$PtCl_2$	5,87
(III) хлорид	$PtCl_3$	5,26 (25° С)
(IV) хлорид	$PtCl_4$	2,43
Плутоний		
арсенид	PuAs	10,39
(III) бромид	$PuBr_3$	6,69
(II) гидрид	PuH_2	10,40
(III) гидрид	PuH_3	9,61
(III) иодид	PuI_3	6,92
(IV) карбид	PuC	13,5
нитрид	PuN	14,25
(II) оксид	PuO	13,89
(IV) оксид	PuO_2	11,44
сульфид	PuS	10,6
(III) фторид	PuF_3	9,32
(IV) фторид	PuF_4	7,00
(VI) фторид	PuF_6	4,86
(III) хлорид	$PuCl_3$	5,70

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
Празеодим		
бромид	$PrBr_3$	5,26
иодид	PrI_3	2,31
карбид, ди-	PrC_2	5,10
(II, IV) оксид	Pr_2O_3	7,07
(IV) оксид	PrO_2	6,82
сульфат	$Pr_2(SO_4)_3$	3,72 (16° C)
сульфид	Pr_2S_3	5,24
фторид	PrF_3	6,14
хлорид	$PrCl_3$	4,02 (25° C)
Протактиний		
(II) оксид	PaO	13,43
(V) оксид	Pa_2O_5	9,0
(IV) фторид	PaF_4	6,36
(IV) хлорид	$PaCl_4$	4,72
Радий		
бромид	$RaBr_2$	5,78
хлорид	$RaCl_2$	4,91
Рений		
(IV) оксид	ReO_2	11,4 (25° C)
(VI) оксид	ReO_3	6,9—7,3
(VII) оксид	Re_2O_7	8,2
оксид фторид, тетра-	ReF_4O	3,717 ждк.
оксид, три-, хлорид	$ReClO_3$	3,87
(IV) сульфид	ReS_2	7,51
(VII) сульфид	Re_2S_7	4,87
(IV) фторид	ReF_4	5,38 (26° C)
(VI) фторид	ReF_6	3,62 ждк.
(V) хлорид	$ReCl_5$	4,9
Родий		
(III) оксид	Rh_2O_3	8,20
сульфид	Rh_2S_3	6,40 (25° C)
фторид	RhF_3	5,38
Ртуть		
(I) бромид	Hg_2Br_2	7,31
(II) бромид	$HgBr_2$	6,11 (25° C)
(I) иодид	Hg_2I_2	7,70
(II) иодид	HgI_2	
(α-фаза)		6,36
(β-фаза)		6,09
(I) нитрат	$Hg_2(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	4,78
(II) нитрат	$Hg(NO_3)_2 \times \times {}^1/_2H_2O$	4,39
(I) нитрит	$Hg_2(NO_2)_2$	7,33
(I) оксид	Hg_2O	9,8
(II) оксид	HgO	11,1
(II) селенид	$HgSe$	8,27
(I) сульфат	Hg_2SO_4	7,56
(II) сульфат	$HgSO_4$	6,47
(II) сульфид (киноварь)	HgS	
(α-фаза)		8,10
(β-фаза)		7,73
(I) фторид	Hg_2F_2	8,73 (15° C)
(II) фторид	HgF_2	8,95 (15° C)
(I) хлорат	$Hg_2(ClO_3)_2$	6,41

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
(I) хлорид	Hg_2Cl_2	7,15
(II) хлорид	$HgCl_2$	5,53
(II) цианид	$Hg(CN)_2$	4,00
Рубидий		
бромат	$RbBrO_3$	3,68
бромид	$RbBr$	3,36
гидрид	RbH	2,60
гидроксид	$RbOH$	3,203 (11° C)
иодид	RbI	3,55
иодид, трн-	RbI_3	4,03
карбонат	Rb_2CO_3	3,47
нитрат	$RbNO_3$	3,11
нитрид	RbN_3	2,79
оксид	Rb_2O	3,72
пероксид	Rb_2O_2	3,65 (0° C)
перхлорат	$RbClO_4$	2,80
селенат	Rb_2SeO_4	3,90
сульфат	Rb_2SO_4	3,61
сульфид	Rb_2S	2,91
ди-, сульфид, пента-	Rb_2S_5	2,62 (15° C)
супероксид	RbO_2	3,80
фторид	RbF	3,56
хлорид	$RbCl$	2,76
Рутений		
(IV) оксид	RuO_2	6,97
(VIII) оксид	RuO_4	3,29
(IV) сульфид	RuS_2	6,99
(V) фторид	RuF_5	2,96 (16,5° C)
(III) хлорид	$RuCl_3$	3,11
Самарий		
(II) бромид	$SmBr_2$	5,1
(III) бромид	$SmBr_3$	5,40
(III) иодид	SmI_3	3,14
карбид	SmC_2	5,86
(II) нитрат	$Sm(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	2,38
(III) оксид	Sm_2O_3	7,43 (15° C)
(III) сульфат	$Sm_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$	2,93
сульфид	Sm_2S_3	5,73
(III) фторид	SmF_3	6,64
(II) хлорид	$SmCl_2$	4,56 (25° C)
(III) хлорид	$SmCl_3$	4,46
Свинец		
арсенат	$Pb(AsO_4)_2$	7,80
(II) бромид	$PbBr_2$	6,67
иодат	$Pb(IO_3)_2$	6,16
иодид	PbI_2	6,16
карбонат	$PbCO_3$	6,56
нитрид	$Pb(N_3)_2$	
(α-фаза)		4,71
(β-фаза)		4,93
нитрат	$Pb(NO_3)_2$	4,53
(I) оксид	Pb_2O	8,342
(II) оксид	PbO	
(α-фаза)		9,51
(β-фаза)		8,70
(II, IV) оксид (сурик)	Pb_3O_4	8,79

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
(IV) оксид	PbO_2	
(α-фаза)		9,67
(β-фаза)		9,33
селенат	$PbSeO_4$	6,37
селенид	SbSe	8,10 (15° C)
силикат, мета-	$PbSiO_3$	6,49
сульфат	$PbSO_4$	6,35
сульфид	PbS	7,59
теллурид	PbTe	8,16
фосфат, орто-	$Pb_3(PO_4)_2$	6,9—7,3
фторид	PbF_2	
(α-фаза)		8,37
(β-фаза)		7,68
хлорат	$Pb(ClO_3)_2$	3,89
(II) хлорид	$PbCl_2$	5,85
(IV) хлорид	$PbCl_4$	3,18 (0° C)
Селен		
(I) бромид	Se_2Br_2	3,60 (15° C)
гидрид	H_2Se	2,00 (—42° C) ждк.
карбид	SeC_2	2,68
(IV) оксид	SeO_2	3,95 (16° C)
(VI) оксид	SeO_3	3,6
оксид фторид, ди-	SeF_2O	2,67
оксид хлорид, ди-	$SeCl_2O$	2,42
сульфид	SeS	3,06 (0° C)
(IV) фторид	SeF_4	2,75 (25° C) ждк.
(VI) фторид	SeF_6	$2,26 \cdot 10^{-3}$ (—35° C)
(I) хлорид	Se_2Cl_2	2,91 (17,5° C)
(IV) хлорид	$SeCl_4$	3,80
Селенистая кислота	H_2SeO_3	3,00 (15° C)
Селеновая кислота	H_2SeO_4	2,95 (15° C)
Селеноводород	H_2Se	$3,670 \cdot 10^{-3}$
Сера		
(I) бромид	S_2Br_2	2,63
гидрид	H_2S	0,96 (—60° C)
(IV) оксид	SO_2	$2,927 \cdot 10^{-3}$
(VI) оксид	SO_3	1,97 ждк.
ди-, оксид хлорид, тетра-	S_2OCl_4	1,66 (0° C)
(I) фторид	S_2F_2	1,5 (—100° C) ждк.
(IV) фторид	SF_4	1,92 (—73° C) ждк.
(VI) фторид	SF_6	$6,50 \cdot 10^{-3}$
ди-, фторид, дека-	S_2F_{10}	2,08 (0° C)
(I) хлорид	S_2Cl_2	1,67 (25° C)
(II) хлорид	SCl_2	1,62 (15° C)
Двусерная кислота	$H_2S_2O_7$	1,9
Серная кислота	H_2SO_4	1,8305
Сероводород	H_2S	$1,538 \cdot 10^{-3}$ (25° C)
Сульфурил фторид	SO_2F_2	$3,72 \cdot 10^{-3}$
Сульфурил фторид хлорид	SO_2ClF	$1,623 \cdot 10^{-3}$ (0° C)
Сульфурил хлорид	SO_2Cl_2	1,67
Тионил фторид	SOF_2	$2,93 \cdot 10^{-3}$
Тионил хлорид	$SOCl_2$	1,655 (10,4° C)
Хлоросерная кислота	HSO_3Cl	1,77
Серебро		
арсенат, орто-	Ag_3AsO_4	6,66 (25° C)
бромат	$AgBrO_3$	5,21
бромид	AgBr	6,47 (25° C)

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
иодат	$AgIO_3$	5.53 (16,5° C)
иодид	AgI	
(α-фаза)		5,71
(β-фаза)		5,61—5,67
карбонат	Ag_2CO_3	6,08
нитрат	$AgNO_3$	4,35
нитрит	$AgNO_2$	4,45
(I) оксид	Ag_2O	7,22
(II) оксид	AgO	7,44
периодат	$AgIO_4$	5,57
перхлорат	$AgClO_4$	2,81
селенат	Ag_2SeO_4	5,72
селенид	Ag_2Se	8,0
сульфат (α-фаза)	Ag_2SO_4	5,45 (29,2° C)
сульфид	Ag_2S	7,32
теллурид	Ag_2Te	8,5
фосфат, орто-	Ag_3PO_4	6,37 (25° C)
(I) фторид	AgF	5,85 (15° C)
(II) фторид	AgF_2	4,57
хлорат	$AgClO_3$	4,43
хлорид	AgCl	5,56
цианид	AgCN	3,95
Скандий		
борид	ScB_2	3,65
бромид	$ScBr_3$	3,91
оксид	Sc_2O_3	3,86
сульфат	$Sc_2(SO_4)_3$	2,58
хлорид	$ScCl_3$	2,39 (25° C)
Стронций		
борид	SrB_6	3,39 (15° C)
бромид	$SrBr_2$	4,22 (24° C)
гидрид	SrH_2	3,72
гидроксид	$Sr(OH)_2$	3,63
иодат	$Sr(IO_3)_2$	5,05 (15° C)
иодид	SrI_2	4,55 (25° C)
карбид	SrC_2	3,2
карбонат	$SrCO_3$	3,70
нитрат	$Sr(NO_3)_2$	2,99
нитрит	$Sr(NO_2)_2 \cdot H_2O$	2,41 (0° C)
оксид	SrO	4,7
пероксид	SrO_2	4,56
селенат	$SrSeO_4$	4,23
селенид	SrSe	4,38
сульфат	$SrSO_4$	3,96
сульфид	SrS	3,70 (15° C)
теллурид	SrTe	4,83
фторид	SrF_2	4,24
фторид хлорид	SrClF	4,18
хлорат	$Sr(ClO_3)_2$	3,15
хлорид	$SrCl_2$	3,05
Сурьма		
(III) бромид	$SbBr_3$	4,15
гидрид	SbH_3	$2,26 \cdot 10^{-3}$
(III) иодид	SbI_3	4,92 (17° C)
(III) оксид (α-фаза)	Sb_2O_3	5,19 (25° C)
(IV) оксид	Sb_2O_4	4,07
(V) оксид	Sb_2O_5	3,78
сульфат	$Sb_2(SO_4)_3$	3,62 (4° C)
(III) сульфид	Sb_2S_3	4,64
(V) сульфид	Sb_2S_5	4,12

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м³
(III) теллурид	Sb_2Te_3	6,50 (13° С)
(III) фторид	SbF_3	4,38 (25° С)
(V) фторид	SbF_5	2,99 (23° С) ждк.
(III) хлорид	$SbCl_3$	3,14
(V) хлорид	$SbCl_5$	2,34 ждк.
Стибин (сурьмянистый водород)	SbH_3	$4{,}36 \cdot 10^{-3}$ (15° С)
Таллий		
(I) бромид	TlBr	7,56 (17° С)
(I) иодид	TlI	
(α-фаза)		7,07
(β-фаза)		7,30
(III) иодид	TlI_3	7,557
карбонат	Tl_2CO_3	7,2
нитрат	$TlNO_3$	5,56 (21,4 С)
(I) оксид	Tl_2O	9,52 (16° С)
(III) оксид	Tl_2O_3	9,65
перхлорат	$TlClO_4$	4,89
селенид	Tl_2Se	9,05 (25° С)
сульфат (α-фаза)	Tl_2SO_4	6,67
(I) сульфид	Tl_2S	8,46
тиоцианат	TlSCN	4,96
фосфат, орто-	Tl_3PO_4	6,89 (10° С)
(I) фторид (α-фаза)	TlF	8,36
(III) фторид	TlF_3	8,36 (25° С)
(I) хлорид	TlCl	7,00
Тантал		
борид	TaB_2	12,38
(V) бромид	$TaBr_5$	4,67
(V) иодид	TaI_5	5,80
карбид	TaC	14,4
нитрид	TaN	14,36
(V) оксид (α-фаза)	Ta_2O_5	8,53
(V) фторид	TaF_5	4,74
(V) хлорид	$TaCl_5$	3,76
Теллур		
(II) бромид	$TeBr_2$	5.24
(IV) бромид	$TeBr_4$	4,31 (15° С)
гидрид	TeH_2	2,68 (—12° С)
(IV) иодид	TeI_4	5,40
(IV) оксид	TeO_2	
(β-фаза)		5,87
(α-фаза)		6,02
(VI) оксид	TeO_3	5,08
(VI) фторид	TeF_6	2,56 (—26° С) ждк.
(II) хлорид	$TeCl_2$	7,05
(IV) хлорид	$TeCl_4$	3,26
Теллуристая кислота	H_2TeO_3	3,05
Теллуровая кислота, орто-	H_6TeO_6	
(α-фаза)		3,07
(β-фаза)		3,17
Теллуроводород	H_2Te	$5{,}81 \cdot 10^{-3}$
Тербий		
бромид	$TbBr_3$	4,67
иодид	TbI_3	3,16
оксид	Tb_2O_3	7,81
фторид	TbF_3	7,24
хлорид	$TbCl_3$	4,35

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м³
Титан		
(I) борид	TiB	5,09
(II) борид	TiB_2	4,50
(II) бромид	$TiBr_2$	4,31
(IV) бромид (β-фаза)	$TiBr_4$	3,24
гидрид	TiH_2	3,9 (12° С)
(II) иодид	TiI_2	4,99
(IV) иодид	TiI_4	4,40 (25° С)
карбид	TiC	4,92
нитрид	TiN	5,43
(II) оксид	TiO	4,93
(III) оксид	Ti_2O_3	4,6
(IV) оксид	TiO_2	3,84
сульфид	Ti_2S	4,12
ди-, сульфид, три-	Ti_2S_3	3,58
сульфид, ди-	TiS_2	3,22
фосфид	TiP	3,95 (25° С)
(III) фторид	TiF_3	3,40
(IV) фторид	TiF_4	2,79
(II) хлорид	$TiCl_2$	3,13
(III) хлорид	$TiCl_3$	2,64
(IV) хлорид	$TiCl_4$	1,73
Торий		
(IV) борид	ThB_4	8,45
(VI) борид	ThB_6	6,4 (15° С)
бромид	$ThBr_4$	5,67
гидрид	ThH_2	5,92
иодид	ThI_4	6,00
карбид	ThC_2	8,96
оксид	ThO_2	9,69
силикат, орто-	$ThSiO_4$	6,82 (16° С)
силицид	$ThSi_2$	7,96 (16° С)
сульфат	$Th(SO_4)_2$	4,22
сульфид	ThS_2	7,36
фосфат, мета-	$Th(PO_3)_4$	4,08 (16° С)
фосфид	Th_3P_4	8,56
фторид	ThF_4	6,19
хлорид	$ThCl_4$	4,59 (15° С)
Тулий		
бромид	$TmBr_3$	5,02
иодид	TmI_3	3,32
оксид	Tm_2O_3	8,77
фторид	TmF_3	7,97
Углерод		
бромид	CBr_4	3,42
иодид	CI_4	4,34
(II) оксид	CO	$1{,}25 \cdot 10^{-3}$ (0° С)
(IV) оксид	CO_2	$1{,}977 \cdot 10^{-3}$ (0° С)
три-, оксид, ди-	C_3O_2	1,11 (0° С) ждк.
селенид	CSe_2	2,66 (25° С)
три-, сульфид, ди-	C_3S_2	1,27
сульфид	CS	1,66
сульфид, ди- (сероуглерод)	CS_2	1,263
фторид	CF_4	1,96 (—184° С) ждк.
хлорид (четыреххлористый углерод)	CCl_4	1,587
Дициан	$(CN)_2$	$2{,}335 \cdot 10^{-3}$
Карбонил бромид	$COBr_2$	2,44

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
Карбонил селенид	COSe	1,81 (4° С) ждк.
Карбоил сульфид	COS	$1{,}073 \cdot 10^{-3}$
Карбоил фторид	COF_2	1,139(—114° С) ждк.
Карбоил хлорид (фосген)	COCl	$1{,}392 \cdot 10^{-3}$
Тиокарбоил селеид	CSSe	1,99
Тиокарбоил хлорид	$CSCl_2$	1,51 (15° С)
Циановодород	HCN	0,688 ждк
Уран		
борид	UB_2	12,70
(III) бромид	UBr_3	6,53
(IV) бромид	UBr_4	5,35
гидрид	UH_3	10,95
(III) иодид	UI_3	6,38
(IV) иодид	UI_4	5,6 (15° С)
карбид	UC	13,63
карбид, ди-	UC_2	11,68
(IV) оксид	UO_2	10.95
(VI) оксид	UO_3	
(α-фаза)		8,34
(β-фаза)		8,02
три-, оксид, окта-	U_3O_8	8,30
иитрид	UN	14,31
сульфид	US	10,87
сульфид, ди-	US_2	7,96 (25° С)
(III) фторид	UF_3	8,96
(IV) фторид	UF_4	6,7—6,9
(V) фторид	UF_5	5,81
(VI) фторид	UF_6	5,06
(III) хлорид	UCl_3	5,35
(IV) хлорид	UCl_4	4,87
(V) хлорид	UCl_5	3,81
(VI) хлорид	UCl_6	3,56
Уранил ацетат	$UO_2(CH_3COO)_2 \times 2H_2O$	2,89 (15° С)
Уранил иитрат	$UO_2(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	3,35
Уранил сульфат	$UO_2SO_4 \cdot 3H_2O$	3,28 (16,5° С)
Уранил фторид	UO_2F_2	5,8 расч.
Уранил хлорид	UO_2Cl_2	5,28
Фосфор		
(III) бромид	PBr_3	2,85 (15° С)
(III) иодид	PI_3	3,89
нитрид хлорид, ди-	$(PCl_2N)_3$	1,98
(III) оксид	P_2O_3	2,135
(IV) оксид	PO_2	2,54
(V) оксид	P_2O_5	2,30
тетра-, селенид,три-	P_4Se_3	1,31
тетра-, сульфид, три-	P_4S_3	2,03 (17° С)
тетра, сульфид, гепта-	P_4S_7	2,19 (17° С)
тетра-, сульфид, дека-	P_4S_{10}	2,03
(III) фторид	PF_3	$3{,}907 \cdot 10^{-3}$
(V) фторид	PF_5	$5{,}805 \cdot 10^{-3}$
фторид, три-, хлорид, ди-	PCl_2F_3	$5{,}4 \cdot 10^{-3}$
(III) хлорид	PCl_3	1,57
(V) хлорид	PCl_5	2,11

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
Тиофосфорил бромид	$PSBr_3$	2,85 (17° С)
Тиофосфорил хлорид	$PSCl_3$	1,64
Фосфии	PH_3	$1{,}529 \cdot 10^{-3}$
Фосфин, ди-	P_2H_4	1,012
Фосфоний иодид	PH_4I	2,86
Фосфорил бромид	$POBr_3$	2,82
Фосфорил фторид	POF_3	$4{,}8 \cdot 10^{-3}$
Фосфорил хлорид	$POCl_3$	1,675 ждк.
Фосфористая кислота	$H_2(HPO_3)$	1,65
Фосфорная кислота, мета-	HPO_3	2,2—2,5
Фосфориая кислота, орто-	H_3PO_4	1,83 (18° С)
Фосфорноватистая кислота	$H(H_2PO_2)$	1.49
Фтор		
оксид	F_2O	1,90 (—224° С)
оксид, ди-	F_2O_2	1,45 (—57° С)
фтороводород	HF	0,991(—19,9°С)ждк.
Хлор		
гидрат-, окта-	$Cl_2 \cdot 8H_2O$	1,23
(I) оксид	Cl_2O	$3{,}89 \cdot 10^{-3}$ (0° С)
(IV) оксид	ClO_2	1,64 (0° С) ждк.
(VII) оксид	Cl_2O_7	1,86 (0° С)
фторид	ClF	1,62(—108° С) ждк.
фторид, три-	ClF_3	1,866 (10° С)
Хлориая кислота	$HClO_4$	1,768
Хлороводород	HCl	$1{,}639 \cdot 10^{-3}$
Хром		
арсенид	CrAs	6,35 (16° С)
борид	CrB	6,17
(II) бромид	$CrBr_2$	4,37
(III) бромид	$CrBr_3$	4,25 (25° С)
(II) иодид	CrI_2	5,20
(III) иодид	CrI_3	4,92 (25° С)
карбид	Cr_3C_2	6,68
карбонил, гекса	$Cr(CO)_6$	1,77
нитрид	CrN	5,8
(III) оксид	Cr_2O_3	5,21
(VI) оксид	CrO_3	2,70
оксид, ди-, хлорид, ди-	$CrCl_2O_2$	1,91
силицид	Cr_2Si_3	5,5 (0°С)
сульфат	$Cr_2(SO_4)_3$	3,01
сульфид	CrS	4,85
фосфид	CrP	5,7 (15° С)
(II) фторид	CrF_2	4,11
(III) фторид	CrF_3	3,78
(II) хлорид	$CrCl_2$	2,88 (25° С)
(III) хлорид	$CrCl_3$	3,03
Цезий		
амид	$CsNH_2$	3,44 (25° С)
бромат	$CsBrO_3$	4,11 (16° С)
бромид	CsBr	4,44
гидрид	CsH	3,41
гидроксид	CsOH	3,68
иодат	$CsIO_3$	4,85
иодид	CsI	4,51 (25° С)

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
иодид-, три-	CsI_3	4,47
нитрат	$CsNO_3$	3,69
оксид	Cs_2O	4,36
пероксид	Cs_2O_2	4,25
перхлорат	$CsClO_4$	3,33 (4° C)
селенат	$CsSeO_4$	4,45
сульфат	Cs_2SO_4	4,24
супероксид	CsO_2	3,77
фторид	CsF	3,59
хлорат	$CsClO_3$	5,57
хлорид	$CsCl$	3,97
цианид	$CsCN$	2,93
Церий		
(IV) борид	CeB_4	5,74
бромид	$CeBr_3$	5,18
карбид	CeC_2	5,23
иодид	CeI_3	2,27
(III) оксид	Ce_2O_3	6,86
(IV) оксид	CeO_2	7,3
селенат	$Ce_2(SeO_4)_3$	4,46
силицид	$CeSi_2$	5,67 (17° C)
(III) сульфат	$Ce_2(SO_4)_3$	3,91
(IV) сульфат	$Ce(SO_4)_2$	3,91 (18° C)
сульфид	Ce_2S_3	5,91
фосфат, орто-	$CePO_4$	5,22
фторид	CeF_3	6,16
хлорид	$CeCl_3$	3,92 (0° C)
Цинк		
антимонид	Zn_3Sb_2	6,33
арсенид	Zn_3As_2	5,53
бромид	$ZnBr_2$	4,20 (25° C)
гидроксид	$Zn(OH)_2$	3,05
иодид	ZnI_2	4,73 (25° C)
карбонат	$ZnCO_3$	4,42
нитрат	$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	2,07 (14° C)
нитрид	Zn_3N_2	6,22 (25° C)
оксид	ZnO	5,7
селенид	$ZnSe$	5,42 (15° C)
силикат, мета-	$ZnSiO_3$	3,42
силикат, орто-	Zn_2SiO_4	4,103
сульфат	$ZnSO_4$	3,74
сульфид	ZnS	
(α-фаза)		4,09
(β-фаза)		3,98—4,08
теллурид	$ZnTe$	6,34 (15° C)
фосфат, орто-	$Zn_3(PO_4)_2$	4,00 (15° C)
фосфид	Zn_3P_2	4,55
фторид	ZnF_2	4,90
хлорид	$ZnCl_2$	2,91 (25° C)
цианид	$Zn(CN)_2$	1,85
Циркоиий		
борид	ZrB_2	6,09
гидрид	ZrH_2	5,74
гидроксид	$Zr(OH)_4$	3,25
карбид	ZrC	6,73
нитрид	ZrN	7,09
оксид (α-фаза)	ZrO_2	5,68
селенит	$Zr(SeO_3)_2$	4,3
силикат, орто-	$ZrSiO_4$	4,56
силицид	$ZrSi_2$	4,88 (22° C)
сульфат	$Zr(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$	3,22 (16° C)

Продолжение табл. 5.3

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
сульфид	ZrS_2	3,87
фосфид	ZrP_2	4,77 (25° C)
(IV) фторид	ZrF_4	4,43
(II) хлорид	$ZrCl_2$	3,16 (18° C)
(III) хлорид	$ZrCl_3$	3,00 (18° C)
(IV) хлорид	$ZrCl_4$	2,80
Эрбий		
борид	ErB_2	4,61
бромид	$ErBr$	4,93
иодид	ErI_3	3,28
оксид	Er_2O_3	8,64
сульфат	$Er_2(SO_4)_3$	3,68
сульфид	Er_2S_3	6,21
фторид	ErF_3	7,81
хлорид	$ErCl_3$	4,1

5.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА [5, 7]

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
Азетидин	C_3H_7N	0,8465
Азиридин	C_2H_5N	0,8349 (25° C)
Анилин	C_6H_7N	1,02173
— 2-бром-	C_6H_6BrN	1,578
— 3-бром-	C_6H_6BrN	1,5793
— 4-бром-	C_6H_6BrN	1,4970 (100° C)
— *N*-метил-	C_7H_9N	0,98912
— 2-метил-	C_7H_9N	0,99843
— 3-метил-	C_7H_9N	0,98912
— 4-метил-	C_7H_9N	0,9619
— 2-метокси-	C_7H_9NO	1,0923
— 3-метокси-	C_7H_9NO	1,096
— 4-метокси-	C_7H_9NO	1,071 (57° C)
— 2-нитро-	$C_6H_6N_2O_2$	1,442 (15° C)
— 3-нитро-	$C_6H_6N_2O_2$	1,1747 (160° C)
— 4-нитро-	$C_6H_6N_2O_2$	1,424
— 2-фтор-	C_6H_6FN	1,1478
— 3-фтор-	C_6H_6FN	1,1580 (17,5° C)
— 4-фтор-	C_6H_6FN	1,1725
— 2-хлор-	C_6H_6ClN	1,21251
— 3-хлор-	C_6H_6ClN	1,217
— 4-хлор-	C_6H_6ClN	1,175 (70° C)
Арабиноза (α, β)	$C_5H_{10}O_5$	1,585
Ацетальдегид	C_2H_4O	0,7834
— трибром-	Br_3C_2HO	2,665 (25° C)
— трихлор-	Cl_3C_2HO	1,5121
Бензальдегид	C_7H_6O	1,0447
—, оксим-	C_7H_7NO	1,1111
— 2-гидрокси-	$C_7H_6O_2$	1,1674
— 4-гидрокси-	$C_7H_6O_2$	1,129 (130° C)
— 2-нитро-	$C_7H_5NO_3$	1,2844 (50° C)
— 3-нитро-	$C_7H_5NO_3$	1,2792
— 2-фтор-	C_7H_5FO	1,16 (15° C)
— 3-фтор-	C_7H_5FO	1,176 (24° C)
— 4-фтор-	C_7H_5FO	1,181
— 2-хлор-	C_7H_5ClO	1,2483
— 3-хлор-	C_7H_5ClO	1,2410

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
— 4-хлор-	C_7H_5ClO	1,196 (61° С)
Бензиламин	C_7H_9N	0,9813
Бензо (*c*) изоксазол	C_7H_5NO	1,1827
Бензойная кислота	$C_7H_6O_2$	1,2659 (15° С)
— , азид	$C_7H_6ON_3$	1,1680 (35° С)
— , амид	C_7H_7ON	1,0792 (130° С)
— , бромангидрид	C_7H_5OBr	1,5461
— , нитрил	C_7H_5N	1,0052
— , фторангидрид	C_7H_5OF	1,155
— , хлорангидрид	C_7H_5OCl	1,212
— 2-амино-	$C_7H_7NO_2$	1,412
— 3-амино-	$C_7H_7NO_2$	1,5104 (4° С)
— 4-амино-	$C_7H_7NO_2$	1,374 (25° С)
— 3-бром-	$C_7H_5BrO_2$	1,845
— 4-бром-	$C_7H_5BrO_2$	1,894
— 2-гидрокси-	$C_7H_6O_3$	1,443
— 4-гидрокси-	$C_7H_6O_3$	1,482 (25° С)
— 2,3-дигидрокси-	$C_7H_6O_4$	1,542
— 2-нитро-	$C_7H_5NO_4$	1,575
— 3-нитро-	$C_7H_5NO_4$	1,494
— 2-фтор-	$C_7H_5FO_2$	1,460 (25° С)
— 3-фтор-	$C_7H_5FO_2$	1,474 (25° С)
— 4-фтор-	$C_7H_5FO_2$	1,479 (25° С)
— 2-хлор-	$C_7H_5ClO_2$	1,544
— 3-хлор-	$C_7H_5ClO_2$	1,496 (25° С)
Бензол	C_6H_6	1,0880
— азидо —	$C_6H_5N_3$	1,0709 (22° С)
— 1-азидо-3-метил-	$C_7H_7N_3$	1,0527 (22° С)
— 1-азидо-4-метил-	$C_7H_7N_3$	1,0655 (25° С)
— бром-	C_6H_5Br	1,4950
— 1-бром-2-иод-	C_6H_4BrI	2,2571 (25° С)
— 1-бром-2-метил-	C_7H_7Br	1,4327
— 1-бром-2-метоксн-	C_7H_7BrO	1,5018
— 1-бром-2-нитро-	$C_6H_4BrNO_2$	1,6245 (80° С)
— 1-бром-2-фтор-	C_6H_4BrF	1,7038
— 1-бром-3-фтор-	C_6H_4BrF	1,7081
— 1-бром-2-хлор-	C_6H_4BrCl	1,6444
— гексадейтеро-	C_6D_6	0,9465
— гексафтор-	C_6F_6	1,612
— 1,2-дибром-	$C_6H_4Br_2$	1,9843
— 1,3-дибром-	$C_6H_4Br_2$	1,9523
— 1,2-дибром-4-метил-	$C_7H_6Br_2$	1,812
— 1,2-дибром-4-нитро-	$C_6H_3Br_2NO_2$	2,354 (8° С)
— 1,2-диод	$C_6H_4I_2$	2,54
— 1,2-динитро-	$C_6H_4N_2O_4$	1,3119
— 1,4-динитро-	$C_6H_4N_2O_4$	1,625
— 2,4-динитро-1-хлор-	$C_6H_3ClN_2O_4$	1,4717
— 1,3-дифтор-	$C_6H_4F_2$	1,1572
— 1,4-дифтор-	$C_6H_4F_2$	1,1701
— 1,2-дихлор-	$C_6H_4Cl_2$	1,3048
— иод-	C_6H_5I	1,81548
— 1-иод-2-метил-	C_7H_7I	1,7090
— 1-иод-3-метил-	C_7H_7I	1,6981
— 1-иод-2-нитро-	$C_6H_4INO_2$	1,9786 (75° С)
— 1-иод-2 (трифторметил)-	$C_7H_4F_3I$	1,896 (26° С)
— 1-иод-3 (трифторметил)-	$C_7H_4F_3I$	1,887
— 1-иод-4-фтор-	C_6H_4FI	1,9523 (15° С
— 1-иод-2-хлор-	C_6H_4ClI	1,9515 (25° С)
— метил-(толуол)	C_7H_8	0,86694
— 1-метил-2,3-динитро-	$C_7H_6N_2O_4$	1,2625 (111° С)
— 1-метил-2,4-динитро-	$C_7H_6N_2O_4$	1,321 (70° С)

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
— 1-метил-2,4-дихлор-	$C_7H_6Cl_2$	1,2459
— 2-метил-1,3-дихлор-	$C_7H_6Cl_2$	1,2686
— 1-метил-2-нитро-	$C_7H_7NO_2$	1,16296
— 1-метил-2-нитро-4-хлор-	$C_7H_6ClNO_2$	1,256 (80° С)
— 1-метил-2,3,4-тринитро-	$C_7H_5N_3O_6$	1,62
— 1-метил-2-фтор-	C_7H_7F	1,003
— 1-метил-3-фтор-	C_7H_7F	0,9974
— 1-метил-2-хлор-	C_7H_7Cl	1,0826
— метокси	C_7H_8O	0,99402
— 1-метокси-2,3-динитро-	$C_7H_6N_2O_5$	1,524
— 1-метокси-2-нитро-	$C_7H_7NO_3$	1,2540
— 1-метокси-2-фтор-	C_7H_7FO	1,1293 (17,5° С)
— 1-метокси-2-хлор-	C_7H_7ClO	1,1911
— 1-нитро-2,3-дихлор-	$C_6H_3Cl_2NO_2$	1,721 (14° С)
— нитропентахлор-	$C_6Cl_5NO_2$	1,718 (25° С)
— 1-нитро-2-фтор-	$C_6H_4FNO_2$	1,3289
— 1-нитро-2-хлор-	$C_6H_4ClNO_2$	1,348 (45° С)
— пентафтор (трифторметил)-	C_7F_8	1,660 (25° С)
— пентахлор-	C_6HCl_5	1,8342 (16,5° С)
— 1,2,3-трибром-4-метил-	$C_7H_5Br_3$	2,456
— 1,3,5-тринитро-	$C_6H_3N_3O_6$	1,76
— трифторметил- (бензотрифторид)	$C_7H_5F_3$	1,1886
— 1-(трифторметил)-2-хлор-	$C_7H_4ClF_3$	1,364 (25° С)
— 1,2,4-трихлор-	$C_6H_3Cl_3$	1,4542
— фтор-	C_6H_5F	1,0225
— (фторметил)-	C_7H_7F	1,0228 (25° С)
— 1-фтор-2-(трифторметил)	$C_7H_4F_4$	1,293 (26° С)
— 1-фтор-2-(трихлорметил)	$C_7H_4Cl_3F$	1,4523 (18,6° С)
— 1-фтор-2-хлор-	C_6H_4ClF	1,2233 (30° С)
— 1-фтор-3-хлор-	C_6H_4ClF	1,221 (25° С)
— 1-фтор-2-(хлорметил)-	C_7H_6ClF	1,2162 (24° С)
— хлор-	C_6H_5C	1,10630
— 1-хлор-2-(трихлорметил)	$C_7H_4Cl_4$	1,5187
— 1-хлор-2-(хлорметил)	$C_7H_6Cl_2$	1,2743
Бензолсульфоновая кислота		
— , метиловый эфир	$C_7H_8O_3S$	1,2734 (17° С)
— , фторангидрид	$C_6H_5FO_2S$	1,3286
— , хлорангидрид	$C_6H_5ClO_2S$	1,3766 (25° С)
1,2,3-Бензолтриол	$C_6H_6O_3$	1,453
Бензолтиазол	C_7H_5NS	1,2460
— 2-хлор-	C_7H_4ClNS	1,3715
1,4-Бензохинон	$C_6H_4O_2$	1,318
— 2-метил-	$C_7H_6O_2$	1,08 (75° С)
Бноксиран	$C_4H_6O_2$	1,1157
1,2-Бутадиен	C_4H_6	0,652
1,3-Бутадиен	C_4H_6	0,6211
1,2-Бутадиен, 4-бром-	C_4H_5Br	1,4255
1,3-Бутадиен, 1-бром-	C_4H_5Br	1,4174
— 2-бром-	C_4H_5Br	1,397
— 1-бром-2-метил-	C_5H_7Br	1,3271
— гексафтор-	C_4F_6	1,553 (—20° С)
— гексахлор-	C_4Cl_6	1,682
— 1,4-дихлор-	$C_4H_4Cl_2$	1,2692
— 2-иод-	C_4H_5I	1,7278

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
1,2-Бутадиен, 3-метнл-	C_5H_8	0,6804
1,3-Бутаднен-2-метил- (изопрен)	C_5H_8	0,6805
— 1-метокси-	C_5H_8O	0,8296
— 2-фтор-(фторопрен)	C_4H_5F	0,843 (4° С)
1,2-Бутадиен, 4-хлор-	C_4H_5Cl	0,9891
1,3-Бутадиен, 1-хлор-	C_4H_5Cl	0,9606
— 2-хлор-(хлоропрен)	C_4H_5Cl	0,9583
2,3-Бутадиен-1-ол	C_4H_6O	0,9164
Бутадиин (диацетилен)	C_4H_2	0,7364 (0° С)
Бутан	C_4H_{10}	0,5788
— 1-бром-3,3-диметил-	$C_5H_{10}Br$	1,1556
— 1,4-дибром-	$C_4H_8Br_2$	1,7890
— 1,4-диод-	$C_4H_8I_2$	2,349 (26° С)
— 2,3-диметил-	C_6H_{14}	0,6616
— 2,2-диметил-3,3-дихлор-	$C_6H_{12}Cl_2$	0,8767
— 1,4-дихлор-	$C_4H_8Cl_2$	1,1408
— 1-иод-	C_4H_9I	1,6154
— 2-иод-	C_4H_9I	1,592
— 1-иод-2-метнл-	$C_5H_{11}I$	1,5253
— 2-метил-(изопентан)	C_5H_{12}	0,6201
— 2-метил-2-хлор-	$C_5H_{11}Cl$	0,8653
— 1-метокси-	$C_5H_{12}O$	0,7443
— 1-нитро	$C_4H_9O_2N$	0,9710
— 1-фтор-	C_4H_9F	0,7789
— 1-фтор-4-хлор-	C_4H_8FCl	1,0627 (25° С)
— 1-хлор-	C_4H_9Cl	0,8862
Бутаналь	C_4H_8O	0,8040
—, оксим	C_4H_9ON	0,923
— 2-бром-	C_4H_7OBr	1,469
— 2,3-дихлор-	$C_4H_6OCl_2$	1,266
— 2-метил-	$C_5H_{10}O$	0,803
— 4-метокси	$C_5H_{10}O_2$	0,942
— 2-оксо-	$C_4H_6O_2$	1,0285
— 4-хлор-	C_4H_7OCl	1,107 (8,5° С)
— 3-этоксн-	$C_6H_{12}O_2$	0,897
Бутандналь	$C_4H_6O_2$	1,064
Бутандиовая кислота (янтарная кислота)	$C_4H_6O_4$	1,563
—, дметиловый эфир	$C_6H_{10}O_4$	1,1197
—, динитрил	$C_4H_4N_2$	0,9867 (60° С)
—, дихлорангидрид	$C_4H_4O_2Cl_2$	1,3748
—, диэтиловый эфир	$C_8H_{14}O_4$	1,041
— 2-гидроксн-	$C_4H_6O_5$	1,45
1,2-Бутандиол	$C_4H_{10}O_2$	1,0024
Бутановая кислота (масляная кислота)	$C_4H_8O_2$	0,9577
—, амид	C_4H_9ON	0,885 (120° С)
—, бромангидрид	C_4H_7OBr	1,4162 (17° С)
—, бутнловый эфир	$C_8H_{16}O_2$	0,8709
—, нитрил	C_4H_7N	0,7911
—, пропиловый эфир	$C_7H_{14}O_2$	0,8722
—, фторангидрид	C_4H_7OF	0,944 (11° С)
—, хлорангндрнд	C_4H_7OCl	1,0277
—, этнловый эфир	$C_6H_{12}O_2$	0,8790
— 2,3-диоксо-, -этиловый эфир	$C_6H_8O_4$	1,151 (26° С)
— 2,2-дифтор-	$C_4H_6O_2F_2$	1,22 (25° С)
— 2-метнл	$C_5H_{10}O_2$	0,9340 (25° С)
— 2-метокси-	$C_5H_{10}O_3$	1,0486
— 4-метокси-	$C_5H_{10}O_3$	1,0596
— 2-оксо-	$C_4H_6O_3$	1,20 (17° С)

Продолжение табл. 5.4

Названнне	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
— 4-хлор-	$C_4H_7O_2Cl$	1,2236
— 2-этил-	$C_6H_{12}O_2$	0,9239
1-Бутанол	$C_4H_{10}O$	0,8096
2-Бутанол	$C_4H_{10}O$	0,8063
1-Бутанол, 2-амино-	$C_4H_{11}ON$	0,939 (26° С)
2-Бутанол, 1-амино-	$C_4H_{11}ON$	0,927 (17° С)
1-Бутанол, 2,2-диметил-	$C_6H_{14}O$	0,8273
2-Бутанол, 2,3-диметил-	$C_6H_{14}O$	0,8277
2-Бутанол, 3-иод-	C_4H_9OI	1,7980 (15° С)
1-Бутанол, 2-метил-	$C_5H_{12}O$	0,8193
2-Бутанол, 1-нитро-	$C_4H_9O_3N$	1,1303 (25° С)
2-Бутанол, 1-хлор-	C_4H_9OCl	1,0738
2-Бутанон	C_4H_8O	0,8054
2-Бутанон, 1-гидрокси-	$C_4H_8O_2$	1,026
2-Бутанон, 1-хлор-	C_4H_7OCl	1,085
1-Бутансульфоновая кислота	$C_4H_{10}O_3S$	1,1906 (25° С)
2-Бутансульфоновая кислота	$C_4H_{10}O_3S$	1,227 (25° С)
1-Бутантиол	$C_4H_{10}S$	0,8416
2-Бутантиол	$C_4H_{10}S$	0,830
1-Бутантиол, 2-метил-	$C_5H_{12}S$	0,842
2-Бутантиол, 2-метил-	$C_5H_{12}S$	0,812
1,2,4-Бутантриол	$C_4H_{10}O_3$	1,02
1-Бутен	C_4H_8	0,5951
2-Бутен (*транс*)	C_4H_8	0,6042
1-Бутен, 2-бром-3-метил-	C_5H_9Br	1,2328
1-Бутен, 1-бром-3-метил-	C_5H_9Br	1,2819
2-Бутен, 2-метил-	C_5H_{10}	0,6623
2-Бутен, 2-метил-1-хлор-	C_5H_9Cl	0,9327
2-Бутен, 2-метокси-	$C_5H_{10}O$	0,8054 (15° С)
1-Бутен, 2-нитро-	$C_4H_7O_2N$	1,0188
1-Бутен, октафтор-	C_4F_8	1,5443 (0° С)
2-Бутен, октафтор-	C_4F_8	1,5297 (0° С)
2-Бутен, 1-хлор-(*транс*)	C_4H_7Cl	0,9205 (15° С)
1-Бутен, 2-этил-	C_6H_{12}	0,6894
2-Бутен, 1-этокси-	$C_6H_{12}O$	0,7846
2-Бутеналь (кротоновый альдегид)	C_4H_6O	0,8495 (25° С)
3-Бутеналь, 2,2-диметил-	$C_6H_{10}O$	0,8184 (25° С)
2-Бутеналь, 2-хлор-	C_4H_5OCl	1,1404 (23° С)
Бутендиовая кислота (*транс*) (фумаровая кислота)	$C_4H_4O_4$	1,625
Бутендиовая кислота (*цис*) (малеиновая кислота)	$C_4H_4O_4$	1,590
—, динитрил (*транс*)	$C_4H_2N_2$	0,9416 (111° С)
2-Бутен-1,4-диол (*транс*)	$C_4H_8O_2$	1,080
3-Бутен-1,2-диол	$C_4H_8O_2$	1,0466
1-Бутен-3-ин	C_4H_4	0,7095 (0° С)
2-Бутеновая кислота (*транс*) (кротоновая кислота)	$C_4H_6O_2$	0,973 (72° С)
2-Бутеновая кислота (*цис*) (изокротоновая кислота)	$C_4H_6O_2$	1,0267
3-Бутеновая кислота	$C_4H_6O_2$	1,0091
3-Бутеновая кислота, 2,2-диметил-	$C_6H_{10}O_2$	0,963
3-Бутеновая кислота, 2-хлор-	$C_4H_5O_2Cl$	1,237
2-Бутеновая кислота, 2-этил-	$C_6H_{10}O_2$	0,9578 (50° С)

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
2-Бутен-1-ол (*транс*) (протиловый эфир)	C_4H_8O	0,8532
2-Бутен-1-ол (*цис*)	C_4H_8O	0,8662
3-Бутен-1-ол	C_4H_8O	0,8454
3-Бутен-2-ол	C_4H_8O	0,8413
3-Бутен-1-ол, 2-бром-	C_4H_7OBr	1,5130
3-Бутен-2-ол, 1-бром-	C_4H_7OBr	1,5205
3-Бутен-2-ол, 2,3-диметил	$C_6H_{12}O$	0,8396
2-Бутен-1-ол, 2-метил-	$C_5H_{10}O$	0,863 (24° C)
3-Бутен-2-ол, 2-метнл-	$C_5H_{10}O$	0,825
3-Бутен-1-ол, 2-хлор-	C_4H_7OCl	1,1044
3-Бутен-2-ол, 1-хлор-	C_4H_7OCl	1,1123
3-Бутен-2-он	C_4H_6O	0,8459
2-Бутен-1-тиол	C_4H_8S	0,883 (23° C)
3-Бутен-1-тнол	C_4H_8S	0,9087
Бутиламин	$C_4H_{11}N$	0,7414
втор-Бутиламин	$C_4H_{11}N$	0,724
трет-Бутнламнн	$C_4H_{11}N$	0,6598
Бутиламин, *N*, *N*-диметнл	$C_6H_{15}N$	0,7206
— *N*-изопропнл-	$C_7H_{17}N$	0,741
— *N*-метил-	$C_5H_{13}N$	0,7377
— 1-метил-	$C_5H_{13}N$	0,7424
трет-Бутилгидропероксид	$C_4H_{10}O_2$	0,8930
трет-Бутилгипохлорит	C_4H_9OCl	0,9583
Бутилизотиоцианат	C_5H_9NS	0,9546
трет-Бутнлизотиоцианат	C_5H_9NS	0,9187 (10° C)
Бутнлнитрат	$C_4H_9O_3N$	1,0153
втор-Бутилнитрат	$C_4H_9O_3N$	1,0264
Бутилнитриг	$C_4H_9O_2N$	0,8823
втор-Бутилнитрит	$C_4H_9O_2N$	0,8728
трет-Бутилнитрит	$C_4H_9O_2N$	0,867
1-Бутин	C_4H_6	0,6784 (0° C)
2-Бутин	C_4H_6	0,6510
1-Бутин, 3,3-диметил-	C_6H_{10}	0,6695
2-Бутин, 1,4-диметокси-	$C_6H_{10}O_2$	0,9575
— 1,4-дихлор-	$C_4H_4Cl_2$	1,258
1-Бутин, 3-метил-	C_5H_8	0,666
1,2-Гексадиен	C_6H_{10}	0,7149
1,3-Гексадиен, 5-хлор-	C_6H_9Cl	0,9275
2,4-Гексадиеналь	C_6H_8O	0,898
1,3-Гексадиен-5-ин	C_6H_6	0,7806
2,4-Гексадиенол	$C_6H_{10}O$	0,8967
1,4-Гексадиен-3-он	C_6H_8O	0,8959
1,4-Гексадиин	C_6H_6	0,825 (0° C)
1,5-Гексадиин	C_6H_6	0,8049
Гексан	C_6H_{14}	0,6603
— 1-бром-	$C_6H_{13}Br$	1,1744
— 1,2-диб ром-	$C_4H_{12}Br_2$	1,5774
— 1,6-дииод-	$C_6H_{12}I_2$	2,03
— 2,2-диметил-	C_6H_{18}	0,6953
— 1,2-дихлор-	$C_6H_{12}Cl_2$	1,085 (15° C)
— 1-иод-	$C_6H_{13}I$	1,4397
— 2-метил-	C_7H_{16}	0,6787
— 1-фтор-	$C_6H_{13}F$	0,7995
— 1-фтор-6-хлор-	$C_6H_{12}FCl$	1,015
— 1-хлор-	$C_6H_{13}Cl$	0,8785
Гексаналь (капроновый альдегид)	$C_6H_{12}O$	0,8139
1,6-Гександиаль (адипиновый альдегид)	$C_6H_{10}O_2$	1,003

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
Гександновая кислота (адипиновая кислота)	$C_6H_{10}O_4$	1,360 (25° C)
—, диметиловый эфир	$C_8H_{17}O_4$	1,060
—, динитрил	$C_6H_8N_2$	0,9676
2,5-Гександиол	$C_6H_{14}O_2$	0,9610
2,5-Гександион	$C_6H_{10}O_2$	0,9737
Гексановая кислота (капроновая кислота)	$C_6H_{12}O_2$	0,9274
—, метиловый эфир	$C_7H_{14}O_2$	0,8846
—, нитрнл	$C_6H_{11}N$	0,8052
—, хлорангидрид	$C_6H_{11}OCl$	0,9754
1-Гексанол	$C_6H_{14}O$	0,8136
2-Гексанон	$C_6H_{12}O$	0,8113
1-Гексантиол	C_6H_{14}	0,8424
1,3,5-Гексатриен (*транс*)	C_6H_8	0,7420
1,3,5-Гексатрнен (*цис*)	C_6H_8	0,7175
1-Гексен	C_6H_{12}	0,6731
2-Гексен (*транс*)	C_6H_{12}	0,6784
2-Гексен (*цис*)	C_6H_{12}	0,6869
3-Гексен (*транс*)	C_6H_{12}	0,6772
3-Гексен (*цис*)	C_6H_{12}	0,6796
2-Гексен, 2,5-диметил-	C_7H_{13}	0,720
1-Гексен, 2-метил-	C_7H_{14}	0,7030
1-Гексен, 1-хлор-	$C_6H_{11}Cl$	0,8872
2-Гексеналь (*транс*)	$C_6H_{10}O$	0,8491
1-Гексен-3-ин	C_6H_8	0,7492
1-Гексен-3-ол	$C_6H_{12}O$	0,834
Гексиламин	$C_6H_{15}N$	0,776
1-Гексин	C_6H_{10}	0,7155
2-Гексин	C_6H_{10}	0,7315
3-Гексин	C_6H_{10}	0,7236
Гептан	C_7H_{16}	0,68376
— 1-бром-	$C_7H_{15}Br$	1,140
— 1,1-дихлор-	$C_7H_{14}Cl_2$	1,0008
— 1-иод-	$C_7H_{15}I$	1,3791
— перфтор-	C_7F_{16}	1,7333
— 1-хлор-	$C_7H_{15}Cl$	0,8758
Гептаналь	$C_7H_{14}O$	0,8495
Гептандиовая кислота	$C_7H_{12}O_4$	1,329 (15° C)
1,7-Гептандиол	$C_7H_{16}O_2$	0,9569 (25° C)
2,4-Гептандион	$C_7H_{12}O_2$	0,9411 (15° C)
Гептановая кислота	$C_7H_{14}O_2$	0,920
1-Гептанол	$C_7H_{16}O$	0,8219
2-Гептанон	$C_7H_{14}O$	0,8111
1-Гептантиол	$C_7H_{16}S$	0,8427
1-Гептен	C_7H_{14}	0,6970
1-Гептен-3-нн	C_7H_{10}	0,7603
2-Гептен-4-ол	$C_7H_{14}O$	0,8445
3-Гептен-2-он (*транс*)	$C_7H_{12}O$	0,8496
Гептиламин	$C_7H_{17}N$	0,7754
1-Гептин	C_7H_{12}	0,7328
2-Гептин	C_7H_{12}	0,7480
3-Гептин	C_7H_{12}	0,7527
2-Гептин-1-ол	$C_7H_{12}O$	0,884 (27° C)
Гидрохинон	$C_6H_6O_2$	1,358
Глиоксаль	$C_2H_2O_2$	1,14
Диаллилсульфид	$C_6H_{10}S$	0,8877 (27° C)
Диаллилсульфоксид	$C_6H_{10}SO$	1,0261
Диаллилсульфон	$C_6H_{10}SO_2$	1,1215
Дибутиламин	$C_8H_{19}N$	0,7670
Дибутиловый эфир	$C_8H_{18}O$	0,7689
Ди-*трет*-бутилпероксид	$C_8H_{18}O_2$	0,796

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м³
Дибутилсульфид	$C_{18}H_{18}S$	0,8386
Дивиниловый эфир	C_4H_6O	0,773
Дивинилсульфид	C_4H_6S	0,9174 (15° С)
Диизопропиламин	$C_6H_{15}N$	0,7163
N, *N'*-Диизопропилгидразин	$C_6H_{10}N_2$	0,7929
Диизопропилдисульфид	$C_6H_8S_2$	0,9435
Диизопропиловый эфир	C_6H_8O	0,7241
Диизопропилсульфид	C_6H_8S	0,8142
Диметиламин	C_2H_7N	0,6804 (0° С)
N, *N*-Диметилгидразин	$C_2H_8N_2$	0,7911
Диметилдисульфид	$C_2H_6S_2$	1,0647
Диметилдихлоргерманий	$C_2H_6GeCl_2$	1,492
Диметилсульфат	$C_2H_6O_4S$	1,3332 (15° С)
Диметилсульфид	C_2H_6S	0,8483
Диметилсульфит	$C_2H_6O_3S$	1,2129
Диметилсульфоксид	C_2H_6OS	1,1014
1,3-Диоксан	$C_4H_8O_2$	1,0319
1,3-Диоксолан	$C_3H_6O_2$	1,060
— 2-метил-	$C_4H_8O_2$	0,9811
1,3-Диоксолан-2-он (этиленкарбонат)	$C_3H_4O_3$	1,3218 (39° С)
— 4-метил-	$C_4H_6O_3$	1,2057
Дипропилдисульфид	$C_6H_{14}S_2$	0,9599
Дипропиловый эфир	$C_6H_{14}O$	0,736
Дипропилсульфат	$C_6H_{14}O_4S$	1,1064
Дипропилсульфид	$C_6H_{14}S$	0,8377
Дипропилсульфоксид	$C_6H_{14}OS$	0,9654
Дипропилсульфон	$C_6H_{14}O_2S$	1,0278 (50° С)
1,3-Дитиолан	$C_3H_6S_2$	1,259 (17° С)
Диэтиламин	$C_4H_{11}N$	0,7059
N, *N*-Диэтилгидразин	$C_4H_{12}N_2$	0,8004
Диэтилдисульфид	$C_4H_{10}S_2$	0,9931
Диэтиловый эфир (этиловый эфир)	$C_4H_{10}O$	0,71378
— 1,2-дибром-	$C_4H_8OBr_2$	1,7315
— 1,1-дихлор-	$C_4H_8OCl_2$	1,1285
— 1-хлор-	C_4H_9OCl	0,9493
— 2-хлор-	C_4H_9OCl	0,9894
Диэтилпероксид (перекись этила)	$C_4H_{10}O_2$	0,8240
Диэтилсульфат	$C_4H_{10}O_4S$	1,1842 (15° С)
Диэтилсульфид	$C_4H_{10}S$	0,8362
Диэтилсульфит	$C_4H_{10}O_3S$	1,0829
Изобутиламин	$C_4H_{11}N$	0,7346
Изобутилизотиоцианат	C_5H_9NS	0,9638 (14° С)
Изоксазол	C_3H_3NO	1,078
Изопентиламин	$C_5H_{13}N$	0,7491
Изопентилнитрат	$C_5H_{11}O_3N$	0,9961 (22° С)
Изопропенилизоцианат	C_4H_5ON	0,8776
Имидазол	$C_3H_4N_2$	1,0303 (101° С)
— 1-метил-	$C_4H_6N_2$	1,0325
Инден	C_9H_8	0,9957
Индол	C_8H_7N	1,0718 (56° С)
Индолин	C_8H_9N	1,069
Кетен	C_2H_2O	$1{,}45 \cdot 10^{-3}$
—, диэтилацеталь	$C_4H_{12}O_2$	0,8776 (25° С)
Ксилоза	$C_5H_{10}O_5$	1,525
Малоновая кислота	$C_3H_4O_4$	0,619 (16° С)
—, диметиловый эфир	$C_5H_8O_4$	1,1528
—, динитрил	$C_3H_2N_2$	1,1910
—, дихлорангидрид	$C_3H_2O_2Cl_2$	1,4509
—, диэтиловый эфир	$C_7H_{12}O_4$	1,0551

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м³
— метил- (изоянтарная кислота)	$C_4H_6O_4$	1,455
Метан	CH_4	0,466 (—164° С)
— азидо-	CH_3N_3	0,869 (8° С)
— бром-	CH_3Br	1,6755
— бромдифтор-	$CHBrF_2$	1,55
— бромдихлор-	$CHBrCl_2$	1,98 (16° С)
— бромиод-	CH_2BrI	2,926 (17° С)
— бромтринитро-	CO_6N_3Br	2,0313
— бромтрихлор-	$CBrCl_3$	2,0122
— бромфторхлор-	$CHBrClF$	1,9771 (0° С)
— дибром- (бромистый метилен)	CH_2Br_2	2,4970
— дибромдихлор-	CBr_2Cl_2	1,42 (25° С)
— дибромфтор-	$CHBr_2F$	2,421
— дибромхлор-	$CHBr_2Cl$	2,451
— дииод-(иодистый метилен)	CH_2I_2	3,3240
дииодфтор-	$CHFI_2$	3,1969 (26° С)
—динитрохлор-	$CHCl(NO_2)_2$	1,6123
— дифенил-	$C_{13}H_{12}$	1,0060
— дифтор- (фтористый метилен)	CH_2F_2	0,909
— дифтордихлор- (фреон-12)	CCl_2F_2	1,64 (—73° С)
— дифторхлор-(фреон-22)	$CHClF_2$	1,4909 (—69° С)
— дихлор- (хлористый метилен)	CH_2Cl_2	1,3266
— иод- (иодистый метил)	CH_3I	2,279
— иоддифтор-	CHF_2I	3,238 (—19° С)
— иоддихлор	$CHCl_2I$	2,392
— иодтрихлор-	CCl_3I	2,355
— иодфтор-	CH_2FI	2,366
— иодхлор-	CH_2ClI	2,422
— нитро-	CH_3NO_2	1,1382
— нитротрихлор- (хлорпикрин)	$CHCl_3NO_2$	1,6566
— нитрофенил- (α-нитротолуол)	$C_4H_9NO_2$	1,1598
— нитрохлор-	CH_2ClNO_2	1,466 (15° С)
— тетрабром-	CBr_4	
(α-фаза)		2,9609 (100° С)
(β-фаза)		3,273
— тетраиод-	CI_4	4,23
— тетранитро-	$C(NO_2)_4$	1,6380
— тетрафтор-	CF_4	1,619 (—129,8°С)
— тетрахлор-	CCl_4	1,5940
— трибром- (бромоформ)	$CHBr_3$	2,8899
— трибромнитро-	CBr_3NO_2	2,7930
— трибромфтор-	CBr_3F	2,7648
— трибромхлор-	CBr_3Cl	2,71 (15° С)
— триод-(иодоформ)	CHI_3	4,008
— тринитро-(нитроформ)	$CH(NO_2)_3$	1,648 (13° С)
— тринитрохлор-	$CCl(NO_2)_3$	1,6769
— трифтор-(фторoформ)	CHF_3	1,52 (—100° С)
— трихлор-(хлороформ)	$CHCl_3$	1,4832
— фтор-(фтористый метил)	CH_3F	0,5786
— фтордихлор-	$CHCl_2F$	1,405 (9° С)
— фтортрихлор- (фреон-11)	CCl_3F	1,4995 (15° С)
— хлор-(хлористый метил)	CH_3Cl	0,9159

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
Метанол	CH_4O	0,7914
Метанол-*D*	CH_3OD	0,8127
Метансульфоновая кислота	CH_4O_3S	1,4812
Метантиол (метилмеркаптан)	CH_4S	0,8665
Метиламин	CH_5N	0,6628
Метилгидразин	CH_6N_2	0,8733
N-Метилгидроксиламин	CH_5ON	1,0003
Метилгидропероксид	CH_4O_2	0,9967 (15° C)
Метилизотиоцианат	C_2H_3NS	1,0691 (37° C)
Метилизоцианат	C_2H_3ON	0,9744 (15° C)
Метилнитрат	CH_3O_3N	1,2075
Метилнитрит	CH_3O_2N	0,991
Метилтиоцианат	C_2H_3NS	1,0678 (25° C)
Метилтрихлоргерманий	CH_3GeCl_3	1,73 (24,5° C)
Морфолин	C_4H_9ON	1,0005
Муравьиная кислота	CH_2O_2	1,22
— , аллиловый эфир	$C_4H_6O_2$	0,946
— , амид (формамид)	CH_3ON	1,1334
— , бутиловый эфир	$C_5H_{10}O_2$	0,8265
— , гексиловый эфир	$C_7H_{14}O_2$	0,8813
— , гептиловый эфир	$C_8H_{16}O_2$	0,8784
— , изобутиловый эфир	$C_5H_{10}O_2$	0,8854
— , изопентиловый эфир	$C_6H_{12}O_2$	0,8857
— , изопропиловый эфир	$C_4H_8O_2$	0,8774
— , метиловый эфир	$C_2H_4O_2$	0,9705
— , нитрил (водород цианистый)	CHN	0,6876
— , пентиловый эфир	$C_6H_{12}O_2$	0,8853
— , пропиловый эфир	$C_4H_8O_2$	0,9039
— , фторангидрид	CHOF	1,099 (0° C)
— , этиловый эфир	$C_3H_6O_2$	0,9168
Надуксусная кислота (гидроперекись ацетила)	$C_2H_4O_3$	1,226 (15° C)
Нафталин	$C_{10}H_8$	1,0253
Неопентиламин	$C_5H_{13}N$	0,7455
Норборнадиен	C_7H_8	0,9064
Оксетан	C_3H_6O	0,9001
Оксетан-2-он	$C_3H_4O_2$	1,146
Оксиран	C_2H_4O	0,8971 (0° C)
— винил-	C_4H_6O	0,8745
— гидроксиметил-	$C_3H_6O_2$	1,1143 (25° C)
— 2,2-диметил-	C_4H_8O	0,8112
— метил-	C_3H_6O	0,8311
— 2,3-тетраметилен	$C_6H_{10}O$	0,9718
— фенил	C_8H_8O	1,0592
— хлорметил-	C_3H_5OCl	1,180
— этил-	C_4H_8O	0,837 (17° C)
Оксиранкарбоновая кислота, этиловый эфир	$C_5H_8O_3$	1,085
Октан	C_8H_{18}	0,8756
Ортомуравьиная кислота, триметиловый эфир	$C_4H_{10}O_3$	0,9676
Ортоугольная кислота, тетраэтиловый эфир	$C_9H_{20}O_4$	0,9186
Ортоуксусная кислота, триметиловый эфир	$C_5H_{12}O_3$	0,9438 (25° C)
1,2-Пентадиен	C_5H_8	0,6926
1,4-Пентадиен-3-он	C_5H_6O	0,8811
1,3-Пентадиин	C_5H_4	0,7909
Пентаметилендиамин	$C_5H_{14}N_2$	0,867 (25° C)
Пентан	C_5H_{12}	0,6262

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
— 1-бром-	$C_5H_{11}Br$	1,2182
— 3-бром-3-метил-	$C_6H_{13}Br$	1,1835
— 1,5-диод-	$C_5H_{10}I_2$	2,1903 (15° C)
— 2,2-диметил-	C_7H_{16}	0,6739
— 1,2-дихлор-	$C_5H_{10}Cl_2$	1,0872
— 3,3-диэтил-	C_9H_{20}	0,7536
— 1-иод-	$C_5H_{11}I$	1,5161
— 2-метил-	C_6H_{14}	0,6532
— 1-метокси-	$C_6H_{14}O$	0,7606
— 1-нитро-	$C_5H_{11}NO_2$	0,9525
— 1-фтор-	$C_5H_{11}F$	0,7907
— 1-хлор-	$C_5H_{11}Cl$	0,8818
— 3-этил-	C_7H_{16}	0,6982
Пентаналь (валериановый альдегид)	$C_5H_{10}O$	0,8095
Пентандиовая кислота (глутаровая кислота)	$C_5H_8O_4$	1,192 (106° C)
— , диметиловый эфир	$C_7H_{12}O_4$	1,0876
— , динитрил	$C_5H_6N_2$	0,9911 (15° C)
—, дихлорангидрид	$C_5H_6O_2Cl_2$	1,3241
1,2-Пентадиол	$C_5H_{12}O_2$	0,9802
2,3-Пентаднон	$C_5H_8O_2$	0,9565
Пентановая кислота (валериановая кислота)	$C_5H_{10}O_2$	0,9391
— , метиловый эфир	$C_6H_{12}O_2$	0,8947
— , нитрил	C_5H_9N	0,7992
— , хлорангидрид	C_5H_9OCl	1,0155 (15° C)
— , этиловый эфир	$C_7H_{14}O_2$	0,8770
— 2-бром-	$C_5H_9O_2Br$	1,381
— 2-метил-	$C_6H_{12}O_2$	0,9230
— 4-оксо-(левулиновая кислота)	$C_5H_8O_3$	1,1335
— 3-хлор-	$C_5H_9O_2Cl$	1,1484
1-Пентанол (амиловый спирт)	$C_5H_{12}O$	0,8144
2-Пентанон	$C_5H_{10}O$	0,8089
1-Пентантиол	$C_5H_{12}S$	0,8421
1-Пентен	C_5H_{10}	0,6405
2-Пентен (*транс*)	C_5H_{10}	0,6482
2-Пентен (*цис*)	C_5H_{10}	0,6556
1-Пентен, 1-бром-	C_5H_9Br	1,2391
1-Пентен, декафтор-	C_5F_{10}	1,2571 (25° C)
2-Пентен, 2,3-диметил-	C_7H_{14}	0,7227
1-Пентен, 2-метил-	C_6H_{12}	0,6799
2-Пентен, 2-метил-	C_6H_{12}	0,6863
1-Пентен, 3-хлор-	C_5H_9Cl	0,8988
1-Пентен, 2-этил-	C_7H_{14}	0,7079
2-Пентеналь	C_5H_8O	0,860
1-Пентен-3-ин (пирилен)	C_5H_6	0,7401
2-Пентеновая кислота	$C_5H_8O_2$	0,9809
1-Пентен-3-ол	$C_5H_{10}O$	0,8395
4-Пентен-1-ол	$C_5H_{10}O$	0,8457
4-Пентен-2-ол	$C_5H_{10}O$	0,8367
Пентиламин	$C_5H_{13}N$	0,7561
трет-Пентиламин	$C_5H_{13}N$	0,7320
Пентилнитрит	$C_5H_{11}O_2N$	0,8958
1-Пентин	C_5H_8	0,6901
2-Пентин	C_5H_8	0,7107
1-Пентин, 5-хлор-	C_5H_7Cl	0,968
2-Пентиновая кислота	$C_5H_6O_2$	0,978
1-Пентин-3-ол	C_5H_8O	0,8859
Пиперидин	$C_5H_{11}N$	0,8698
— 1-метил-	$C_6H_{13}N$	0,8159
— 1-нитрозо-	$C_5H_{10}NO$	1,0631

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
Пиразин	$C_4H_4N_2$	1,0254 (60° С)
Пиразол	$C_3H_4N_2$	1,001 (99,8° С)
2-Пиразолин	$C_3H_6N_2$	1,020 (17° С)
2*H*-Пиран, 3,4-дигидро-	C_5H_8O	0,9261
2*H*-Пиран-2-он (α-пирон)	$C_5H_4O_2$	1,1972
4H-Пиран-4-он (γ-пирон)	$C_5H_4O_2$	1,190
Пиран-2-он, тетрагидро-	$C_5H_8O_2$	1,0794
Пиридазин	$C_4H_4N_2$	1,111
2-Пиридиламин, *N*, *N*-диметил-	$C_7H_{10}N_2$	1,0192
2-Пиридиламин, *N*-метил-	$C_6H_8N_2$	1,0707
Пиридин	C_5H_5N	0,9835
— 2-ацетил-	C_7H_7NO	1,0776 (15° С)
— 2-бром-	C_5H_4BrN	1,6337
— 2-винил-	C_7H_7N	0,9757
— 2,3-диметил-	C_7H_9N	0,9453
— 2-метил-	C_6H_7N	0,9443
— 2-метокси-	C_6H_7NO	1,0457
— 1,2,3,6-тетрагидро-	C_5H_9N	0,9153
— 2-хлор-	C_5H_4ClN	1,2029
— 2-этил-	C_7H_9N	0,9304
Пиридин-4-карбальдегид (изоникотиновый альдегид)	C_6H_5NO	1,1339 (25° С)
Пиримидин	$C_4H_4N_2$	1,1293
Пиррол	C_4H_5N	0,9698
— 1-ацетил-	C_6H_7NO	1,044
— 2,4-диметил-	C_6H_9N	0,9208
— 2-изопропил-	$C_7H_{11}N$	0,906 (25° С)
— 2-метил-	C_5H_7N	0,9295
— 1-пропил-	$C_7H_{11}N$	0,8833
— 1-этил-	C_6H_9N	0,9009
Пирролидин	C_4H_9N	0,8586
— 1-метил-	$C_5H_{11}N$	0,8188
— 1-пропил-	$C_7H_{15}N$	0,8172
— 1-этил-	$C_6H_{13}N$	0,8263
2-Пирролидон	C_4H_7NO	1,120
— 1,5-диметил-	$C_6H_{11}NO$	1,0242
— 1-метил-	C_5H_9NO	1,0328
3-Пирролин	C_4H_7N	0,9097
Пропан	C_3H_8	0,5853 (—45° С)
— 1-бром-	C_3H_7Br	1,3537
— 2-бром-	C_3H_7Br	1,3140
— 1-винилокси-	$C_5H_{10}O$	0,7680
— 1,2-диацетоксн-	$C_7H_{12}O_4$	1,059
— 1,1-дибром-	$C_3H_6Br_2$	1,982
— 1,3-динод-	$C_3H_6I_2$	2,5755
—2,3-диметил (неопентан)	C_5H_{12}	0,6135
— i,1-дихлор-	$C_3H_6Cl_2$	1,1321
— 1-иод-	C_3H_7I	1,7489
— 2-метил-(изобутан)	C_4H_{10}	0,551 (25° С)
— 1-метоксн-	$C_4H_{10}O$	0,738
— 1-нитро-	$C_3H_7NO_2$	0,9955 (25° С)
— 1,2,3-трибром-	$C_3H_5Br_3$	2,4209
— 1,2,3-трихлор-	$C_3H_5Cl_3$	1,3889
— 1-фтор-	C_3H_7F	0,7956
— 1-хлор-	C_3H_7Cl	0,8904
— 1-этокси-	$C_5H_{12}O$	0,7386
Пропаналь (пропионовый альдегид)	C_3H_6O	0,8058
—, диэтилацеталь-	$C_5H_{16}O_2$	0,8232

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность 10^3 кг/м^3
—, оксим-	C_3H_7ON	0,9258
— 2,-бром-	C_3H_5OBr	1,592
— 2,3-дибром-	$C_3H_4OBr_2$	2,198 (16° С)
— 2,2-диметил-	$C_5H_{10}O$	0,7832
— 2,3-дихлор-	$C_3H_4OCl_2$	1,40
— 2-метил-	C_4H_8O	0,7904
— 2-оксо-	$C_3H_4O_2$	1,0455 (24° С)
— 2-хлор-	C_3H_5OCl	1,182 (15° С)
1,2-Пропандиол (пропиленгликоль)	$C_3H_8O_2$	1,0361
1,2-Пропандиол, 3-меркапто-(тиоглицерин)	$C_3H_8O_2S$	1,2455
1,3-Пропандиол, 2-метокси-	$C_4H_{10}O_3$	1,124 (25° С)
1,3-Пропандиол, 2-хлор-	$C_3H_7O_2Cl$	1,3219
1,3-Пропандитиол	$C_3H_8S_2$	1,0783
Пропановая кислота (пропионовая кислота)	$C_3H_6O_2$	0,993
—, ангидрид	$C_6H_{10}O_3$	1,0110
—, бромангидрид	C_3H_5OBr	1,521 (16° С)
—, бутиловый эфир	$C_7H_{14}O_2$	0,8754
—, изобутиловый эфир	$C_7H_{14}O_2$	0,8687
—, изопропиловый эфир	$C_6H_{12}O_2$	0,8660
—, метиловый эфир	$C_4H_8O_2$	0,9150
—, нитрил	C_3H_5N	0,7818
—, пропиловый эфир	$C_6H_{12}O_2$	0,8809
—, фторангидрид-	C_3H_5OF	0,972 (15° С)
—, хлорангидрид-	C_3H_5OCl	1,0646
—, этиловый эфир	$C_5H_{10}O_2$	0,9359
— 2-ацетокси-	$C_5H_8O_4$	1,1758
— 2-бром-	$C_3H_5O_2Br$	1,70
— 2,2-дихлор-	$C_3H_4O_2Cl_2$	1,389 (23° С)
— 2-иод-	$C_3H_5O_2I$	2,073
— 3-меркапто-	$C_3H_6O_2S$	1,218
— 2-метил-(изомасляная кислота)	$C_4H_8O_2$	0,9682
— 2-оксо-(пировиноградная кислота)	$C_3H_4O_3$	1,2272
— 3-фтор-	$C_3H_5O_2F$	1,1815
— 2-хлор-	$C_3H_5O_2Cl$	1,2585
1-Пропанол	C_3H_8O	0,8035
2-Пропанол (изопропиловый спирт)	C_3H_8O	0,7855
2-Пропанол, 1-амино-	C_3H_9ON	0,9611
2-Пропанол, 1-бром-	C_3H_7OBr	1,5585 (30° С)
1-Пропанол, 2,3-дибром-	$C_3H_6OBr_2$	2,0739
2-Пропанол, 2,2-диметил-	$C_5H_{12}O$	0,812
2-Пропанол, 1,3-диметокси-	$C_5H_{12}O_3$	1,0085
1-Пропанол, 2,3-дихлор-	$C_3H_6Cl_2$	1,3506 (25° С)
2-Пропанол, 2-метил-(*трет*-бутиловый спирт)	$C_4H_{10}O$	0,7887
1-Пропанол, 2-нитро-	$C_3H_7O_3N$	1,1841 (25° С)
1-Пропанол, 2-хлор-	C_3H_7OCl	1,103
2-Пропанол, 1-хлор-	C_3H_7OCl	1,115
1-Пропанол, 2-этокси-	$C_5H_{12}O$	0,9044
2-Пропанол, 1-этокси-	$C_5H_{12}O$	0,9028
2-Пропанон (ацетон)	C_3H_6O	0,7899
—, азин	$C_6H_{12}N_2$	0,8389
—, гексахлор	C_3OCl_6	1,7444 (12° С)
—, 1-гидрокси (ацетол)	$C_3H_6O_2$	1,0824
—, 1-хлор-	C_3H_5OCl	1,15
1-Пропансульфоновая кислота, хлорангидрид	$C_3H_7O_2SCl$	1,2826 (15° С)

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
2-Пропансульфоновая кислота	$C_3H_5O_3S$	1,187 (25° С)
1-Пропантиол (пропилмеркаптан	C_3H_8S	0,8411
2-Пропантиол (изопропилмеркаптан)	C_3H_8S	0,8143
1-Пропантиол, 2-метил- (изобутилмеркаптан)	$C_4H_{10}S$	0,8339
2-Пропантиол, 2-метил- (*трет*-бутилмеркаптан)	$C_4H_{10}S$	0,8002
1,2,3-Пропантриол (глицерин)	$C_3H_8O_3$	1,2613
Пропен (пропилен)	C_3H_6	0,5193
1-Пропен, 3-азидо-	$C_3H_5N_3$	0,924 (25° С)
— 1-бром-(*транс*)	C_3H_5Br	1,428
— 2-бром-	C_3H_5Br	1,362
— 3-бром-	C_3H_5Br	1,398
— гексафтор-	C_3F_6	1,583 (—40° С)
— 1,2-дихлор-	$C_3H_4Cl_2$	1,1818
— 3-иод-	C_3H_5I	1,8494
— 2-метил-(изобутилен)	C_4H_8	0,5942
— 3-метокси-	C_4H_8O	0,77 (11° С)
— 1-нитро-	$C_3H_5O_2N$	1,065
— 1,2,3-трихлор-	$C_3H_3Cl_3$	1,414
— 1-хлор-(*транс*)	C_3H_5Cl	0,9350
— 3-этокси-	$C_5H_{10}O$	0,7651
Пропеналь (акриловый альдегид)	C_3H_4O	0,8410
—, диацетат	$C_7H_{10}O_4$	1,0760
—, диэтилацеталь	$C_7H_{14}O_2$	0,8543 (15° С)
— 2-метил-	C_4H_6O	0,837
Пропеновая кислота (акрилловая кислота)	$C_3H_4O_2$	1,0511
—, аллиловый эфир	$C_6H_8O_2$	0,9441
—, бутиловый эфир	$C_7H_{12}O_2$	0,8898
—, изобутиловый эфир	$C_7H_{12}O_2$	0,8896
—, метиловый эфир	$C_4H_6O_2$	0,9535
—, нитрил	C_3H_3N	0,8060
—, хлорангидрид	C_3H_3OCl	1,1136
—, этиловый эфир	$C_5H_8O_2$	0,9234
— 2-метил-(метакриловая кислота)	$C_4H_6O_2$	1,0153
2-Пропен-1-ол (аллиловый спирт)	C_3H_6O	0,8540
— 2-метил (металлиловый спирт)	C_4H_8O	0,8515
2-Пропен-1-тнол (аллилмеркаптан)	C_3H_6S	0,925 (23° С)
Пропиламин	C_3H_9N	1,1064
— *N*, *N*-диметил-	$C_5H_{13}N$	0,7173
— *N*-метил-	$C_4H_{11}N$	0,7574
— 3-метокси	C_3H_9ON	0,7204 (17° С)
— 1,2,2-триметил	$C_6H_{15}ON$	0,7668
— 1-этил-	$C_3H_{13}N$	0,7487
Пропилгидразин	$C_3H_{10}N_2$	0,8406
Пропилендиамин	$C_3H_{10}N_2$	0,8584 (25° С)
Пропилизотиоцианат	C_4H_7NS	0,9781 (16° С)
Пропилизоцианид	C_4H_7N	0,7599 (17° С)
Пропилнитрат	$C_3H_7O_3N$	1,0538
Пропилнитрит	$C_3H_7O_2N$	0,935
Пропин	C_3H_4	0,7062 (—50° С)
— 3-бром-	C_3H_3Br	1,579
— 3-иод-	C_3H_3I	2,0177 (0° С)

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м^3
— 3-метокси-	C_4H_6O	0,83 (12° С)
— 3-хлор-	C_3H_3Cl	1,0297
— 1-этокси-	C_5H_8O	0,8276
Пропиналь (пропиоловый альдегид)	C_3H_2O	0,9152
Пропиновая кислота (пропаргиловая кислота)	$C_3H_2O_2$	1,1380
2-Пропин-1-ол (пропаргиловый спирт)	C_3H_4O	0,9485
Силанол, триметил-	$C_3H_{10}OSi$	0,8112
Тетраэтилгерманий	$C_4H_{20}Ge$	0,9932
Тетраэтилсвинец	$C_4H_{20}Pb$	1,6524
1,4-Тиазин, тетрагидро-	C_4H_9NS	1,0882
Тиазол	C_3H_3NS	1,1998 (17 °С)
Тиетан	C_3H_6S	1,0020
Тиран (этиленсульфид)	C_2H_4S	1,0130
— 2,2-диметил-	C_4H_8S	0,9013
— метил-	C_3H_6S	0,944
— фенил-	C_8H_8S	1,1044 (25° С)
— этил-	C_4H_8S	0,927
Тиопиран-2-он, тетрагидро-	C_5H_8OS	1,155
Тиоуксусная кислота	C_2H_4OS	1,064
Тиофен	C_4H_4S	1,0648
— 2-ацетил-	C_6H_6OS	1,1679
— 2-бром-	C_4H_3BrS	1,684
— 2-гидрокси-	C_4H_4OS	1,255
— 2,5-дибром-	$C_4H_2Br_2S$	2,147 (23° С)
— 2,3-диметил-	C_6H_8S	1,0021
— 2-иод-	C_4H_3IS	2,0595 (25° С)
— 2-метил-	C_5H_6S	1,0193
— тетрагидро-	C_4H_8S	0,9987
— тетрахлор-	C_4Cl_4S	1,7036 (30° С)
— 2-хлор-	C_4H_3ClS	1,2863
— 2-этил-	C_6H_8S	0,9928
Тиофен-1,1-диоксид, тетрагидро-	$C_4H_8O_2S$	1,2615 (30° С)
2-Тиофенкарбальдегид	C_5H_4OS	1,224
Тиофенол	C_6H_6S	1,0766
— 2-метил-	C_7H_8S	1,041
— 4-метокси-	C_7H_8OS	1,1313 (25° С)
— 2-хлор-	C_6H_5ClS	1,2752
1,2,3-Триазол	$C_2H_3N_3$	1,1861 (25° С)
Триметилалюминий	C_3H_9Al	0,752
Триметиламин	C_3H_9N	0,6356
Триметиларсин	C_3H_9As	1,144 (15° С)
Триметилборат	$C_3H_9O_3B$	0,915
Триметилендиамин	$C_3H_{10}N_2$	0,884 (25° С)
Триметилстибин	C_3H_9Sb	1,523 (15° С)
Триметилфосфат	$C_3H_9O_4P$	1,2144
Триметилфосфит	$C_3H_9O_3P$	1,052
Триэтилалюминий	$C_6H_{15}Al$	0,825
Триэтиламин	$C_6H_{15}N$	0,7257
Триэтиларсин	$C_6H_{15}As$	1,150
Триэтилборат	$C_6H_{15}O_3B$	0,8546 (28° С)
Триэтилстибин	$C_6H_{15}Sb$	1,3224 (16° С)
Триэтилфосфат	$C_6H_{15}O_4P$	1,0695
Триэтилфосфин	$C_6H_{15}P$	0,8006
Триэтилфосфит	$C_6H_5O_3P$	0,9629
Угольная кислота, бензиловый эфир, хлорангидрид	$C_8H_7O_2Cl$	1,20
—, бутиловый эфир, хлорангидрид	$C_5H_9O_2Cl$	1,0513

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м³
—, диметиловый эфир	$C_3H_6O_3$	1,0706
—, дипропиловый эфир	$C_7H_{14}O_3$	0,9435
—, дихлорангидрид (фосген)	$COCl_2$	1,381
—, диэтиловый эфир	$C_3H_{10}O_3$	0,9764
—, изобутиловый эфир, хлорангидрид	$C_5H_9O_2Cl$	1,0426
—, изопентиловый эфир, хлорангидрид	$C_6H_{11}OCl$	1,049
—, изопропиловый эфир, хлорангидрид	$C_4H_7O_3Cl$	1,0777
—, метиловый эфир, хлорангидрид	$C_2H_3O_2Cl$	1,2298
—, пропиловый эфир, хлорангидрид	$C_4H_7O_2Cl$	1,0902
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	1,0492
—, аллиловый эфир	$C_5H_8O_2$	0,9277
—, амид,	C_2H_5ON	0,9986 (25° C)
—, ангидрид	$C_4H_6O_3$	1,0820
—, бромангидрид	C_2H_3OBr	1,6625 (16° C)
—, бутиловый эфир	$C_6H_{12}O_2$	0,8825
—, виниловый эфир	$C_4H_6O_2$	0,9342
—, изобутиловый эфир	$C_6H_{12}O_2$	0,8710
—, изопропениловый эфир	$C_5H_8O_2$	0,9090
—, изопропиловый эфир	$C_5H_{10}O_2$	0,8718
—, иодангидрид	C_2H_3OI	2,0674
—, метиловый эфир	$C_3H_6O_2$	0,933
—, нитрил	C_2H_3N	0,7843
—, пентиловый эфир	$C_7H_{14}O_2$	0,8745
—, пропиловый эфир	$C_5H_{10}O_2$	0,8867
—, фторангидрид	C_2H_3OF	1,002 (15° C)
—, хлорангидрид	C_2H_3OCl	1,1051
—, хлорметиловый эфир	$C_3H_5O_2Cl$	1,194
—, этиловый эфир (этилацетат)	$C_4H_8O_2$	0,9003
— амино- (глицин)	$C_2H_5O_2N$	1,1607
— бром-	$C_2H_3O_2Br$	1,9335 (50° C)
— дибром-	$C_2H_2O_2Br_2$	1,0921
— дифтор-	$C_2H_2O_2F_2$	1,5255
— дихлор-	$C_2H_2O_2Cl_2$	1,5634
— меркапто-	$C_2H_4O_2S$	1,3253
— метоксн-	$C_3H_6O_3$	1,1768
— трифтор-	$C_2HO_2F_3$	1,5331 (0° C)
— трихлор-	$C_2HO_2Cl_3$	1,62
— фтор-	$C_2H_3O_2F$	1,3693 (36° C)
— хлор-	$C_2H_3O_2Cl$	1,4034 (40° C)
— этокси-	$C_4H_8O_3$	1,1021
Фенилгидразин	$C_6H_8N_2$	1,0986
Фенилизотиоцианат	C_7H_5NS	1,1303
Фенилизоцианат (карбанил)	C_7H_5NO	1,0946
Фенол (карболовая кислота)	C_6H_6O	1,0576
— 4-меркапто-	C_6H_6OS	1,1285 (25° C)
— 2-метил-	C_7H_8O	1,0273
— 2-нитро-	$C_6H_5NO_3$	1,2942 (40° C)
— 2-хлор-	C_6H_5ClO	1,2634
Формальдегид (муравьиный альдегид)	CH_2O	0,815 (—20° C)
Фуран	C_4H_4O	0,9378
— 2-ацетил-	$C_6H_6O_2$	1,098 (20° C)
— 2-бром-	C_4H_3OBr	1,650
— 2-бромметил-	C_5H_5OBr	1,560

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м³
— 2,5-дибром	$C_4H_2OBr_2$	2,27
— 2,5-диметил	C_6H_8O	0,90
— 2,5-дихлор	$C_4H_2OCl_2$	1,371 (25° C)
— 2-иод-	C_4H_3IO	2,024
— 2-метил-	C_5H_6O	0,9132
— 2-метоксн-	$C_5H_6O_2$	1,0646 (25° C)
— тетрагидро-	C_4H_8O	0,8886
— 2-хлор-	C_4H_3OCl	1,1923
— 2-этил-	C_6H_8O	0,9013
— 2-этокси-	$C_6H_8O_2$	0,9849 (23° C)
2-Фуранкарбальдегид	$C_5H_4O_2$	1,1594
Фурфуриламин	C_5H_7ON	1,0533
Циклобутан	C_4H_8	0,720 (5° C)
— метил-	C_5H_{10}	0,688
— этил-	C_5H_{12}	0,728
Циклобутанкарбоновая кислота	$C_5H_8O_2$	1,057
Циклобутанол	C_4H_8O	0,9226 (15° C)
Циклобутанон	C_4H_6O	0,9548 (0° C)
Циклобутен	C_4H_8	0,733 (0° C)
1,3-Циклогексадиен	C_6H_8	0,8406
Циклогексан	C_6H_{12}	0,7786
— бром-	$C_6H_{11}Br$	1,3360
— 1,2-дибром-(*транс*)	$C_6H_{10}Br_2$	1,7759
— 1,2-дихлор-(*транс*)	$C_6H_{10}Cl_2$	1,2021
— иод	$C_6H_{11}I$	0,7694
— метил-	C_7H_{14}	0,8074
— метилен-	C_7H_{12}	0,8752
— метокси-	$C_7H_{14}O$	1,0610
— нитро-	$C_6H_{11}NO_2$	0,7794
— фтор-	$C_6H_{11}F$	0,9279
— хлор-	$C_6H_{11}Cl$	0,9891
— этил-	C_8H_{16}	0,7880
1,2-Циклогександион	$C_6H_8O_2$	1,1187
Циклогексанкарбальдегид	$C_7H_{12}O$	0,9235 (25° C)
Циклогексанкарбоновая кислота	$C_7H_{12}O_2$	1,0274 (30° C)
Циклогексанол	$C_6H_{12}O$	0,9624
— 1-метил-	$C_7H_{14}O$	0,9194
— 2-хлор-(*транс*)	$C_6H_{11}OCl$	1,1461 (16° C)
Циклогексанон	$C_6H_{10}O$	0,9455
Циклогексантиол	$C_6H_{12}S$	0,9786
Циклогексен	C_6H_{10}	0,8102
1-Циклогексенкарбальдегид	$C_7H_{10}O$	0,9694
1-Циклогексен-1-карбоновая кислота	$C_7H_{10}O_2$	1,109
2-Циклогексен-1-ол	$C_6H_{10}O$	0,9923 (15° C)
2-Циклогексен-1-он	C_6H_8O	0,9931
Циклогексиламин	$C_6H_{13}N$	0,8671
Циклогексилизоцианат	$C_7H_{11}ON$	0,9852
Циклопентан	C_7H_{14}	0,8098
1,2-Циклогептандион	$C_7H_{10}O_2$	1,0607 (22° C)
Циклогептанол	$C_7H_{14}O$	0,9478
Циклогептанон	$C_7H_{12}O$	0,9491
1,3,5-Циклогептатрнен	C_7H_8	0,8875
2,4,6-Циклогептатриенон	C_7H_6O	1,095 (22° C)
Циклогептен	C_7H_{12}	0,8255
Циклопентадиен	C_5H_6	0,8021
— гексахлор	C_6Cl_6	1,7119
Циклопентан	C_5H_{10}	0,7454
— ацетил-	$C_7H_{12}O$	0,9172

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность 10^3 кг/м³
— бром-	C_5H_9Br	1,3873
— метил-	C_6H_{12}	0,7486
— хлор-	C_5H_9Cl	1,0053
— этил-	C_7H_{14}	0,7665
Циклопентанкарбальдегид	$C_6H_{10}O$	0,9371
Циклопентанкарбоновая кислота	$C_6H_{10}O_2$	1,0527
Циклопентанол	$C_5H_{10}O$	0,9478
Циклопентанон	C_5H_8O	0,9450
Циклопентен	C_5H_8	0,7720
Циклопропан	C_3H_6	0,6769 (—30° С)
— ацетил-	C_5H_8O	0,8984
— винил-	C_5H_8	0,7160
— 1,1-диметил-	C_5H_{10}	0,6589
— метил-	C_4H_8	0,6912 (—20° С)
Циклопропанкарбоновая кислота	$C_4H_6O_2$	1,0889
—, метиловый эфир	$C_5H_8O_2$	0,9972
—, нитрил	C_4H_5N	0,8946
—, хлорангидрид	C_4H_5OCl	1,1518
—, этиловый эфир	$C_6H_{10}O_2$	0,9638
Щавелевая кислота	$C_2H_2O_4$	1,653
Этан	C_2H_6	0,509 (—60° С)
— азидо-	$C_2H_5N_3$	0,8765 (25° С)
— бром-	C_2H_5Br	1,4604
— 1-бром-2-фтор	C_2H_4BrF	1,7044 (25° С)
— 1-бром-2-хлор	C_2H_4BrCl	1,7392
— гексабром-	C_2Br_6	2,823
— гексафтор-	C_2F_6	1,590 (—78° С)
— гексахлор-	C_2Cl_6	2,091
— 1,1-дибром-(этилиденбромид)	$C_2H_4Br_2$	2,0555
— 1,2-дибром (бромистый этилен)	$C_2H_4Br_2$	2,1792
— 1,1-дииод-(этилидениодид)	$C_2H_4I_2$	2,84 (0° С)
— 1,2-дииод-	$C_2H_4I_2$	3,325
— 1,2-диметокси-	$C_4H_{10}O_2$	0,86285
— 1,1-динитро-	$C_2H_4O_4N_2$	1,3503 (24° С)
—1,1-дифтор-(этилиденфторид)	$C_2H_4F_2$	0,95
— 1,2-дифтор-	$C_2H_4F_2$	1,024 (10° С)
— 1,1-дихлор-(этилиденхлорид)	$C_2H_4Cl_2$	1,1757
— 1,2-дихлор-(хлористый этилен)	$C_2H_4Cl_2$	1,2351
— иод-	C_2H_5I	1,9358
— метокси-	C_3H_8O	0,7252 (0° С)
— нитро-	$C_2H_5NO_2$	1,0448 (25° С)
— пентабром-	C_2HBr_5	3,312
— пентахлор-	C_2HCl_5	1,6796
— 1,1,1,2-тетрабром-	$C_2H_2Br_4$	2,8748
— 1,1,1,2-тетрахлор-	$C_2H_2Cl_4$	1,54064
— 1,1,2-трибром-	$C_2H_3Br_3$	2,6211
— 1,1,1-трифтор-	$C_2H_3F_3$	$3,78 \cdot 10^{-3}$
— 1,1,1-трифтор-2,2,2-трихлор-	$C_2F_3Cl_3$	1,5790
— 1,1,1-трихлор-(метилхлороформ)	$C_2H_3Cl_3$	1,3390
— фтор-	C_2H_5F	0,7182
— 1-фтор-2-хлор-	C_2H_4FCl	1,1747
— хлор-	C_2H_5Cl	0,8978
Этандиаль (глиоксаль)	$C_2H_2O_2$	1,14

Продолжение табл. 5.4

Название	Формула	Плотность, 10^3 кг/м³
1,2-Этандиол (этиленгликоль)	$C_2H_6O_2$	1,1088
Этаиол (этиловый спирт)	C_2H_6O	0,7983
— 2-азидо-	$C_2H_5ON_3$	1,1454 (25° С)
— 2-амино- (этаноламин)	C_2H_7ON	1,0159
— 2-бром	C_2H_5OBr	1,7629
— 2,2-дихлор-	$C_2H_4OCl_2$	1,4040 (25° С)
— 2-иод-	C_2H_5OI	2,1968
— 2-меркапто-	C_2H_6OS	1,1143
— 2-метокси-	$C_3H_8O_2$	0,9647
— 2-нитро-	$C_2H_5O_3N$	1,270 (15° С)
— 2,2-оксиди- (диэтиленгликоль)	$C_4H_{10}O_2$	1,1160
— 2,2,2-трифтор-	$C_2H_3OF_3$	1,3816 (25° С)
— 2-фтор-	C_2H_5OF	1,1040
— 2-хлор-	C_2H_5OCl	1,2003
— 2-этокси-	$C_4H_{10}O_2$	0,9301
Этаисульфоиовая кислота	$C_2H_6O_3S$	1,3341 (25° С)
Этантиол (этилмеркаптан)	C_2H_6S	0,8391
Этиламин	C_2H_7N	1,0259
Этилгидразин	$C_2H_8N_2$	0,9079
N-Этилгидроксиламин	C_2H_7ON	0,8827 (0° С)
O-Этилгидроксиламин	C_2H_7ON	0,9332
Этилгидропероксид	$C_2H_6O_2$	1,013 (—6° С)
Этилгипохлорит	C_2H_5OCl	0,384 (—10° С)
Этилен	C_2H_4	$1,26 \cdot 10^{-3}$ (0° С)
— бром-	C_2H_3Br	1,4933
— 1,1-дихлор-	$C_2H_2Cl_2$	1,2129
— иод-	C_2H_3I	2,037
— метокси-	C_3H_6O	0,7725 (0° С)
— тетраиод-	C_2I_4	2,983
— тетрафтор-	C_2F_4	1,519 (—76,3° С)
— тетрахлор-	C_2Cl_4	1,6227
— трибром-	C_2HBr_3	2,708
— трихлор-	C_2HCl_3	1,4642
— фтор-	C_2H_3F	0,853 (—26° С)
— хлор-	C_2C_3Cl	0,9106
— этокси-	C_4H_8O	0,7589
Этилендиамин	C_2H_8N	0,9006
Этилизотиоцианат	C_3H_5NS	0,9962
Этилизоцианат	C_3H_5ON	0,9031
Этилизоцианид	C_3H_5N	0,7402
Этилнитрат	$C_3H_5O_3N$	1,1076
Этилнитрит	$C_2H_5O_2N$	0,9017 (14° С)
Этин (ацетилен)	C_2H_2	0,6181 (—22° С)
— бром-	C_2HBr	$4,7 \cdot 10^{-3}$
— метокси-	C_3H_4O	0,8001
— хлор-	C_2HCl	$2,0 \cdot 10^{-3}$
— этокси-	C_4H_6O	0,800

5.5. СПЛАВЫ, МИНЕРАЛЫ, ДЕРЕВО И ДРУГИЕ ТВЕРДЫЕ ВЕЩЕСТВА

Название	Плотность, 10^3 кг/м³
Дерево (сухое)	
атласное	0,95
бальза (пробковое)	0,11—0,14

Продолжение табл. 5.5

Название	Плотность, 10^3 кг/м^3
бамбук	0,31—0,40
бук	0,70—0,90
береза	0,51—0,77
вишня	0,70—0,90
гикори	0,60—0,93
груша	0,61—0,73
дуб	0,60—0,90
ель канадская	0,48—0,70
железное (бакаут)	1,17—1,33
ива	0,40—0,60
камедное	1,00
кедр	0,49—0,57
кизил	0,76
клен	0,62—0,75
красное (Гондурас)	0,66
красное (Испания)	0,85
липа	0,32—0,59
лиственница	0,67
можжевельник	0,56
ольха	0,42—0,68
орех	0,64—0,70
осина	0,50
остролист	0,76
пихта	0,40
платан	0,40—0,60
рожковое	0,67—0,71
самшит	0,95—1,16
сандаловое	0,91
слива	0,66—0,78
сосна:	
белая	0,50—0,55
обыкновенная	0,37—0,60
тик:	
индийский	0,66—0,88
африканский	0,98
тополь	0,35—0,5
эбеновое (черное)	1,11—1,33
эльм	0,54—0,60
яблоня	0,66—0,84
ясень	0,65—0,85
Минералы	
агат	2,5—2,8
алебастр:	
карбонатный	2,69—2,78
сульфатный	2,26—2,32
алмаз	3,01—3,52
альбит	2,62—2,65
андезит	2,2—2,7
анортит	2,74—2,76
асбест	2,1—2,8
асбестовый сланец	1,8
базальт	2,6—3,25
берилл	2,69—2,70
бештаунит	2,4—2,5
газовый уголь	1,88
галенит	7,3—7,6
гематит	4,9—5,3
гипс	2,31—2,33
глина	1,6—2,9
гранат	3,15—4,3
гранит	2,34—2,76
доломит	2,84
известняк	2,68—2,76
известь гашеная	1,15—1,25

Продолжение табл. 5.5

Название	Плотность, 10^3 кг/м^3
кальцит	2,6—2,8
кварц:	
плавленый	2,65
прозрачный	2,21
непрозрачный	2,07
кокс	1,0—1,7
копал	1,04—1,14
коруид	3,9—4,0
кремень	2,63
магнетит	4,9—5,2
малахит	3,7—4,1
мел	1,8—2,6
мергель	2,3—2,5
мрамор	2,6—2,84
наждак	4,0
опал	2,2
пемза	0,4—0,9
песчаник	1,9—2,65
пирит	4,95—5,1
полевой шпат	2,55—2,75
порфир	2,6—2,9
роговая обманка	2,9—3,2
серпантин	2,5—2,65
сланец	2,6—3,3
слюда:	
белая	2,76—3,00
обычная	2,6—3,2
черная	2,7—3,1
соль каменная	2,18
тальк	2,7—2,8
топаз	3,5—3,6
торф, сухой	0,5
торианит (*R*)	9,32—9,33
торит (*R*)	4,5—5,4
трогерит (*R*)	3,3
турмалин	3,0—3,2
туф лавовый	0,75—1,4
уголь:	
антрацит	1,4—1,8
битуминозный	1,2—1,5
уранит (*R*)	6,5—9,7
ураинит:	
кальциевый (*R*)	3,05—3,19
медный (*R*)	3,22—3,60
флюорит	3,18
Сплавы	
алюмель	8,48
броиза	7,5—9,1
вуда	9,7
дюралюминий	2,6—2,9
иивар	7,9
константан	8,88
копель	8,9
куниаль	8,5—8,7
латунь	8,2—8,85
магналиум	2,50
маиганин	8,4
мельхиор	8,9
монель-металл	8,8
нейзильбер	8,7—8,82
никелин	8,8
нихром	8,4
платино-иридиевый	21,62

Продолжение табл. 5.5

Название	Плотность, 10^3 кг/м^3
Сталь:	
нелегированная, низко- и среднелегированная	7,77—7,85
нержавеющая, жаропрочная, жаростойкая	7,9—8,2
ферронихром	8,4
хромель	8,7
чугун:	
белый	7,6—7,8
серый	7,0—7,2
электрон	1,8
Другие вещества	
асфальт	1,1—2,8
бетон	1,8—2,5
битум	~1
бумага	0,7—1,15
вазелин	0,8—0,9
воск пчелиный	0,96
гуммиарабик	1,3—1,4
гуммигут	1,2
деготь, смола	1,02
желатин	1,27
каменное литье	2,9—2,95
камень мыльный	2,6—2,8
камфара	0,99
канифоль	1,07
картон	0,69
каучук растительный	0,91
керамика	2,1—2,3
киноварь	8,12
кирпич:	
обыкновенный	1,4—1,6
огнеупорный	1,7—2,0
кожа сухая	0,86
кость	1,7—2,0
кость слоновая	1,83—1,92
крахмал	1,5
лед (0° С)	0,917
линолеум	1,18
охра	3,5
парафин	0,87—0,91
песок:	
сухой	1,2—1,6
сырой	1,9—2,1
пирекс	2,25
почва	1,3—2,0
пробка	0,22—0,26
резина:	
мягкая	1,1
твердая	1,19
чистая	0,91—0,93
сажа	1,8—1,9
сахар	1,59
ситалл	2,5
смола естественная	1,0—1,1
снег (рыхлый)	0,12
соль поваренная	2,2
стеарин	1,0
стекло:	
боросиликатное термостойкое	2,2—2,4
кварцевое	2,2
обыкновенное	2,4—2,8
флинтглас	3,9—5,9
сургуч	1,8
сурик свинцовый	8,9—9,1

Продолжение табл. 5.5

Название	Плотность, 10^3 кг/м^3
уголь древесный:	
дубовый	0,57
сосновый	0,28—0,44
фарфор	2,3—2,5
фаянс	1,9—1,96
фибра красная	1,45
целлулоид	1,4
цемент затвердевший	2,6—3,2
шамот	1,85—2,2
шифер	2,7—2,8
шлак доменный	2,6—3,0
шлакоситалл:	
белый	1,6—2,77
серый	2,6—2,75
эбонит	1,15
янтарь	1,1

5.6. ПЛАСТМАССЫ [8]

Название	Плотность, 10^3 кг/м^3
Акрилнитрилбутадиенстирольный пластик	1,03—1,05
Акриловинильная масса	1,13
Аминопласт	1,4—2,0
Ангелит	1,7—1,95
Аинд	1,14—1,16
Аинд стеклонаполненный	1,4
Антифрикционный пластик	1,74—1,80
Асботекстолит электротехнический листовой	1,5—1,7
Винипласт:	
листовой	1,38—1,43
ударопрочный	1,40—1,45
Волокнит	1,28—1,45
Гетинакс электротехнический листовой	1,19
Дакрил	1,32
Дифсан	1,25—1,30
Древесно-слоистый пластик типа ДСП	1,35—1,45
Изодин	1,2
Капролит	1,15—1,16
Капролон	1,1—1,2
Капрон	1,3—1,34
Ниплон	0,2—0,4
Пенопласт К-40	1,32—1,40
Пентопласт	1,2
Полиакрилат	1,02—1,13
Полиамид	1,35—1,38
Полиамид стеклонаполненный	
Поливинилхлорид:	
суспензионный	1,34—1,43
эмульсионный	0,5—0,63
Поливинилхлоридный пенопласт	0,1—0,3
Поликарбонат (дифлон)	1,2
Полиметилметакрилат:	
литьевой	1,18—1,2
суспензионный	1,19
Полипропилен	0,9—0,92
Полистирол:	
общего назначения	1,05—1,10
ударопрочный	1,06

Продолжение табл. 5.6

Название	Плотность, 10^3 кг/м^3
Полистирольный пластик	1,2
Полисульфон	1,25
Полиуретан	1,21
Полиэтилен:	
высокого давления	0,90—0,94
низкого давления	0,95—0,96
Полиэтиленпирефталат (лавсан)	1,32—1,53
Ретинакс	2,4—2,7
Смола:	
полиамидная	1,11—1,12
полиэпоксидная	1,1—1,2
полиэфирная	1,08—1,3
эпоксидиановая	1,2—1,3
эпоксидная	1,13—1,2
Сополимер:	
стирола	1,12—1,14
этилена с пропиленом	0,90—0,96
этилена с винилацетатом	0,92—0,96
Стекловолокнит	1,7—1,9
Стекловолокнистый анизотропный материал	1,8—2,0
Стекло органическое:	
конструкционное	1,18—1,19
техническое	1,18
Стеклопластик	1,65—1,78
Стеклотекстолит:	
конструкционный	1,77—1,9
электротехнический	1,6—1,9
Текстолит:	
графитированный	1,3—1,4
конструкционный	1,3—1,4
электротехнический листовой	1,25—1,45
Фенилон	1,35
Фенолит	1,5—1,6
Фенольная прессовочная масса	1,4—1,85
Фенопласт:	
влагохимостойкий	1,5—1,6
жаростойкий	1,75—1,90
литьевой	1,4—1,5
общего назначения	1,40—1,45
ударопрочный	1,45
электроизоляционный	1,85
Флан	1,2—2,6
Фторопласт	1,65—1,80; 2,02—2,23
Фуранит	1,60—1,85
Этрол:	
ацетопропионатцеллюлозный	1,16—1,25
ацетилцеллюлозный	1,27—1,34
нитроцеллюлозный	1,8—2,0

5.7. ЖИДКОСТИ [5, 17]

Название	Плотность, 10^3 кг/м^3
Азотная кислота (100%-ная)	1,50
Ацетон	0,80
Бензин	0,7—0,8
Бензол	0,88
Глицерин	1,26
Дизельное топливо	0,86
Каменноугольная смола	1,05—1,25

Продолжение табл. 5.7

Название	Плотность, 10^3 кг/м^3
Керосин	0,81—0,84
Креозот	1,04—1,10
Мазут	0,91—0,99
Масло:	
касторовое	0,96
растительное	0,91—0,97
трансформаторное	0,84—0,89
Медный купорос:	
10%-ный	1,107
20%-ный	1,230
Молоко	1,03
Нефть	0,73—0,94
Олифа	0,93—0,95
Раствор поваренной соли в воде:	
10%-ный	1,071
20%-ный	1,148
Серная кислота (концентрированная)	1,83
Скипидар	0,87
Соляная кислота (20%-ная)	1,10
Спирт этиловый	0,79
Стекло растворимое (ждк.)	1,35—1,53
Эфир	0,72

5.8. РТУТЬ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ [13]

t, °C	Плотность, 10^3 кг/м^3	t, °C	Плотность, 10^3 кг/м^3
0	13,59503	220	13,06431
10	13,57039	230	13,04048
20	13,54583	240	13,01665
30	13,52133	250	12,99282
40	13,49689	260	12,96898
50	13,47251	270	12,94514
60	13,44819	280	12,92127
70	13,42393	290	12,89739
80	13,39971	300	12,87350
90	13,37554	310	12,8496
100	13,35142	320	12,8256
110	13,32734	330	12,8016
120	13,30330	340	12,7776
130	13,27929	350	12,7536
140	13,25531	360	12,7294
150	13,23137	370	12,7053
160	13,20745	380	12,6811
170	13,18356	390	12,6569
180	13,15968	400	12,6326
190	13,13582	410	12,6082
200	13,11197	420	12,5838
210	13,08814	430	12,5593

Продолжение табл. 5.8

t, °C	Плотность, 10^3 кг/м^3	t, °C	Плотность, 10^3 кг/м^3
440	12,5348	630	12,051
450	12,5101	640	12,025
460	12,4854	650	11,998
470	12,4607	660	11,972
480	12,4358	670	11,945
490	12,4109	680	11,918
500	12,386	690	11,891
510	12,361	700	11,863
520	12,336	710	11,836
530	12,310	720	11,809
540	12,285	730	11,781
550	12,259	740	11,753
560	12,234	750	11,725
570	12,208	760	11,697
580	12,182	770	11,669
590	12,156	780	11,641
600	12,130	790	11,612
610	12,104	800	11,584
620	12,078		

5.9. ДИСТИЛЛИРОВАННАЯ ВОДА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ [6]

t, °C	Плотность, 10^3 кг/м^3	t, °C	Плотность, 10^3 кг/м
0	0,999841	13	0,999377
1	0,999900	14	0,999244
2	0,999941	15	0,999099
3	0,999965	16	0,998943
4	0,999973	17	0,998775
5	0,999965	18	0,998596
6	0,999941	19	0,998406
7	0,999909	20	0,998205
8	0,999849	21	0,997994
9	0,999782	22	0,997772
10	0,999701	23	0,997540
11	0,999606	24	0,997299
12	0,999498	25	0,997047

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Moses J.** The Practicing Scientist's Handbook. A Guide for Physical and Terrestrial Scientists and Engineers. N. Y.: Van Nostrand Reinhold Company. 1978.

2. **Свойства** элементов: Справочник. Ч. 1. Физические свойства/Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия. 1976.

3. **Свойства** неорганических соединений: Справочник/ А. И. Ефимов и др. Л.: Химия. 1983.

4. **Nuclear** Wallet Cards/Ed. by V. S. Shirleg, C. M. Ledered. Produced by the Isotopes Project, Lawrence Berkelly Laboratory, on Behalf of the U. S. Nuclear Data Network, 1979.

5. **Рабинович В. А., Хавин З. Я.** Краткий химический справочник. — 2-е изд. Л.: Химия. 1978.

6. **Гордон А., Форд Р.** Спутник химика. Физико-химические свойства, методики, библиография: Пер. с англ. М.: Мир. 1976.

7. **Свойства** органических соединений: Справочник/ Под ред. А. А. Потехина. Л.: Химия. 1984.

8. **Каицельсон М. Ю., Балаев Г. А.** Пластические массы. Свойства и применение: Справочник. — 3-е изд. Л.: Химия. 1978.

9. **Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В.** Промышленные цветные металлы и сплавы. — 3-е изд. М.: Металлургия. 1974.

10. **Кей Д., Лэби Т.** Справочник физика-экспериментатора: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1949.

11. **Кей Д., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных: Пер. с англ./Под ред. К. П. Яковлева. М.: Физматгиз. 1962.

12. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука. 1972.

13. **Кухлинг, Хорст.** Справочник по физике: Пер. с англ. М.: Мир. 1982.

14. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат. 1968.

15. **Тепловые** и атомные электрические станции: Справочник/Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зориина. М.: Энергоиздат. 1982.

16. **Справочник** химика. Основные свойства неорганических и органических соединений/Под общ. ред. Б. П. Никольского. 3-е изд. Л.: Химия, 1971. Т. 2.

17. **Краткий** справочник химика/Сост. В. И. Перельман. 6-е изд. М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит., 1963.

ГЛАВА 6
ТРЕНИЕ

И. И. Карасик

6.1. ВВЕДЕНИЕ

Основные понятия, относящиеся к трению, регламентированы ГОСТ 23.002—78 [3]. Внешнее трение (трение) — явление сопротивления относительному перемещению, возникающего между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии. Трение покоя наблюдается при предварительных микросмещениях до перехода к относительному движению на макроуровне, после чего (при увеличении сдвигающего усилия) наблюдается трение движения. При трении скольжения скорости тел в точке касания различны по модулю и направлению или по модулю или направлению в отличие от трения качения, когда эти скорости одинаковы и по модулю, и по направлению.

Основной характеристикой трения является сила трения — сила сопротивления при относительном перемещении одного тела на поверхности другого под действием внешней силы, тангенциально направленная к общей границе между телами. При этом различают наибольшую силу трения покоя в пределах предварительных микросмещений (обычно называемую просто силой трения покоя или силой сцепления) и силу трения движения, а также соответственно коэффициент сцепления и коэффициент трения f как отношение указанных сил трения к нормальной относительно поверхностей трения силе (нагрузке), прижимающей тела друг к другу.

В общем случае сила трения движения

$$F = \frac{1}{v}\frac{dA}{dt},$$

где v — скорость относительного перемещения взаимнотрущихся тел; dA/dt — мощность фрикционных потерь, связанных с механическими (деформирование, адгезионное взаимодействие), физическими (адсорбция, звуковые, электромагнитные и др.), химическими (хемосорбция, химическое модифицирование поверхностного слоя) диссипативными процессами (A — работа трения, т. е. диссипируемая энергия).

При обычных лабораторных условиях в инактивных средах и малой скорости скольжения, а также при трении качения решающее значение имеют компоненты диссипации, связанные с механическим взаимодействием в зоне трения.

Сила трения представляет собой результат распределенных по времени и по малым дискретным площадкам области фактического контакта актов взаимодействия различного вида:

непосредственный контакт материалов трущихся тел в исходном состоянии;

контакт через жидкостные масляные слои (гидродинамическая и гидростатическая смазка);

контакт через адсорбированные и хемосорбированные из окружающей среды и смазочного материала вещества (в частности, через граничные слои смазочного материала, частицы пыли и др.);

контакт через вторичные (образующиеся в процессе трения) структуры в поверхностных слоях трущихся тел.

Вклад этих взаимосвязанных компонент в общую силу трения различен при разной нагрузке P и скорости скольжения v, вследствие чего коэффициент трения движения в общем случае является функцией P и v, внешних условий трения и смазки (в том числе условий теплоотвода), формы и размера трущихся тел.

При постоянных значениях указанных параметров и внешних условий после достаточно длительного приработочного периода устанавливаются специфическая для данного комплекса параметров микрогеометрия поверхностей трущихся тел, состав и структура поверхностных слоев, значения силы и коэффициента трения.

В приработочном периоде, как правило, снижается относительная доля пластического и увеличивается доля упругого деформирования на микроконтактах, повышается контакт через защитные слои смазочного материала и вторичные структуры и снижается непосредственный контакт, что в целом приводит к снижению сил трения.

Экспериментальные значения f, в строгом смысле, относятся только к конкретным условиям испытаний и для других условий могут быть использованы лишь как ориентировочные. Имеющиеся в литературе данные, представляющие несомненный практический интерес, относятся к большому многообразию различных нестандартных условий испытаний.

При пользовании таблицами следует учитывать, что от условий испытаний в меньшей степени зависят сравнительные ряды значений f или количественные соотношения между значениями f для разных материалов.

При трении в вакууме вследствие затруднения образования защитных адсорбционных слоев и связанного с этим увеличения адгезионного взаимодействия наблюдается, как правило, более сильное трение. В приработочном периоде стабилизация f происходит при более высоком значении, чем начальное, и завершается после изнашивания поверхностных структур, сформированных в процессе предшествовавшей трению обработки поверхностей.

Повышение v в общем случае проявляется в изменении f вследствие изменения реологических свойств материалов в зоне трения и фрикционного разогрева, а последний влияет на f, так как меняются соотношение между адсорбционными и десорбционными процессами и твердость.

Материалы и сопряжения материалов условно разделяют на антифрикционные ($f=0{,}15\div0{,}12$ без смазки, $f=0{,}1\div0{,}05$ при смазке), используемые в опорах скольжения, и фрикционные ($f=0{,}3\div0{,}35$, реже $f=0{,}5\div0{,}6$), используемые в сцепных фрикционных устройствах (тормоза, муфты, передачи трением).

Чтобы оценка относилась к материалам трущихся сопряжений, в исходном контролируемом состоянии экспериментальное определение f стремятся осуществлять в условиях однородного по поверхности трения контакта (равномерное на макроуровне распределение давления), при постоянных расчетной площади поверхности трения, скорости скольжения (не приводящей к ощутимому нагреву), некоторых характерных значениях давления (например, при давлении, равном твердости или определенной доли твердости).

Пересчет к другим условиям производится на основе расчетных формул, учитывающих реальное контактное давление.

Значение коэффициента трения скольжения f определяется суммой адгезионной $f_а$ и деформационной $f_д$ составляющих, т. е. $f=f_а+f_д$.

Последние, обусловленные потерями повторного передеформирования тонких поверхностных слоев, при трении скольжения имеют существенное значение для весьма шероховатых поверхностей и полимерных материалов (табл. 6.1). Соотношение между адгезионной и деформационной составляющими для металлов таково, что при погрешности порядка 1% значением $f_д$ можно пренебречь.

Прочность адгезионной связи определяется из выражения [4]

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r,$$

где p_r — фактическое давление, представляющее собой частное от деления нагрузки P на суммарную площадь пятен фактического дискретного фрикционного контакта, воспринимающих нагрузку (с учетом микрошероховатости, волнистости и макроотклонений поверхности от гео-

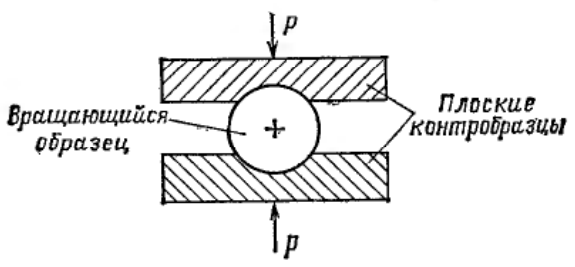


Рис. 6.1. Геометрия расположения образцов при стандартном методе определения τ_0 и β

метрической формы); τ_0, β — параметры, характеризующие свойства материала поверхностных слоев.

На основе этой зависимости

$$f_a = \tau / p_r = \tau_0 / p_r + \beta.$$

Стандартный метод [4] экспериментального определения параметров τ_0 и β основан (рис. 6.1) на: 1) вдавливании образца сферической формы, изготовленного из более твердого материала, в направлении нормали к поверхности плоского контробразца, изготовленного из менее твердого материала, с силой, вызывающей пластическую деформацию последнего; 2) приведении образца во вращение относительно оси, направленной по нормали к поверхности контробразца; 3) измерении моментов, развиваемых силами трения в контакте образца и контробразца, разгружении образцов и измерении размеров отпечатков на контробразце и 4) повторении испытаний при нагрузке на два порядка меньше. При этом считается, что фактическая поверхность контакта равна сферической контурной поверхности зоны вдавливания.

В табл. 6.2 кроме τ_0 и β представлены значения f_{an} коэффициента трения при фактическом давлении, соответствующем твердости (p_r=НВ для образца из менее твердого материала испытываемого сочетания).

Фактическое давление p_r зависит от механических свойств материала в приповерхностном слое и микрогеометрии поверхности. Данными табл. 6.2 можно пользоваться для сравнения параметров режима трения материалов при одинаковых значениях фактического давления. При очень малых давлениях сравнение прочности адгезионной связи производят по значениям τ_0, при высоких давлениях, близких к НВ, коэффициент трения оценивают по f_{an}, при больших p_r и малых τ_0 по β.

Степень зависимости коэффициента трения от фактического давления оценивают по τ_0 и β.

Коэффициент трения качения $f_к$, как и трения скольжения f_c, определяется суммой адгезионной ($f_{ка}$) и деформационной ($f_{кд}$) составляющих, $f_к = f_{ка} + f_{кд}$. Адгезионная составляющая при трении качения без проскальзывания связана с повторным в процессе трения разрывом адгезионных связей в направлении их действия.

Деформационная составляющая $f_{кд}$ при трении качения:

для сферы радиусом r, катящейся по плоскости,

$$f_{кд} = \frac{3}{16} \frac{a}{r} c;$$

для цилиндра радиусом r, катящегося по плоскости,

$$f_{кд} = \frac{2}{3\pi} \frac{a}{r} c,$$

где a — радиус площадки контакта (для сферы) и длина площадки в направлении движения (для цилиндра), рассчитанные по формуле Герца; c — коэффициент гистерезисных (деформационных) потерь, характеризующий внутреннее трение в приповерхностных слоях материала.

Для трения качения большее влияние деформационных (гистерезисных) потерь проявляется у более нагруженных тел, материалов с меньшим модулем упругости, меньшей твердостью (например, у оргстекла). При этом наблюдаются бо́льшие значения $f_к$ по сравнению с материалами, у которых преобладает адгезионная составляющая (например, у стекла). У материалов, занимающих промежуточное положение (например, сталь, медь и др.), существен вклад обеих компонент.

6.2. АДГЕЗИОННАЯ СВЯЗЬ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ (табл. 6.1, 6.2)

Таблица 6.1. **Соотношение между адгезионной F_a и деформационной $f_д$ составляющими при трении скольжения**

Материал	Фторопласт	Полиэтилен низкого давления	Полиамиды	Поликарбонаты	Резины	Металлы
$f_a/f_д$	0,2—1,0	1—2	2—9	4—9	2—3	$\leqslant 100$

Таблица 6.2. **Сдвиговая прочность адгезионной связи различных материалов при трении по стали ШХ-15** [6]

Материал	НВ, 10^7 Па	f_a	τ_0, 10^7 Па	β
Металлы				
Алюминий	23	0,124	3,00	0,043
Бериллий	—	—	0.45	0,250
Ванадий	110,0	0,103	—	—
Железо	130,0	0,097	—	—
(армко)	65,0	0,160	—	—
Висмут	7,70	0,175	0,454	0,116
Вольфрам	285	0,082	—	—
Иридий	0,80	0,20	0,107	0,066
Кадмий	23,0	0,096	0,943	0,055
Кобальт	130,0	0,092	—	—
Магний	44,0	0,082	8,00	0,020
Молибден	186,0	0,095	2,79	0,080
	110,0	0,105	1,87	0,088
Медь	85,0	0,10	1,70	—
	52,0	0,115	1,82	0,080
	28,5	0,139	1,68	—
Никель	180,0	0,095	3,48	—
	105,0	0,130	1,47	0,116
	70,0	0,123	0,49	—
Ниобий	32,0	0,142	0,896	0,114
Олово	4,40	0,170	0,449	0,068
Платина	—	—	9,50	0,10
Рений	105	0,095	—	—
Свинец	3,3	0,140	0,274	0,057
Серебро	55	0,096	0,77	0,081
	—	0,096	1,00	0,080
Сурьма	27,0	0,127	0,73	0,100
Таитал	78,0	0,115	2,42	0,084
Титан	190	0,085	2,90	0,080
	128	0,10	2,82	0,078
Хром	200	0,095	—	—
	100	0,135	1,50	0,120
Цинк	33,0	0,088	—	—
Цирконий	74,0	0,121	—	—
Подшипниковые сплавы				
БН	25	0,102	—	—
Б83	24	0,150	—	—
АСС-6-5	—	—	1,0	0,065
А-20	—	—	1,6	0,050
Бронза бериллиевая	150	0,095	—	—
А-9	—	—	0,75	0,12
ЦАМ	—	—	0,50	0,05
Бр. Б2	—	0,095	2,45	0,085
Бр. АЖ Мц 10-3-1,5	—	0,120	2,00	0,100

Продолжение табл. 6.2

Материал	НВ, 10^7 Па	f_a	τ_0, 10^7 Па	β
Пластмассы				
Винипласт светлый	12,0	0,091	0,372	0,06
Капролои	13,0	0,065	0,15—0,195	0,05
Капрон технический	7,0	0,063	0,161	0,04
Полиэтилен ПЭВД	2,0	0,080	0,044	0,058
	2,6	0,090	0,130	0,040
Полиэтилен ПЭНД	3,8	0,080	0,114	0,050
Полипропилен	3,70	0,380	0,011	0,035
Поликапроамид	7,50	0,088	—	—
Полиамид 68П	16,0	0,085	—	—
Полиметилметакрилат	—	0,220	1,0	0,150
Оргстекло	16,0	0,220	—	—
Фторопласт	3,10	0,028	0,341	0,017
Фенилон	31.0	0,065	—	—
Древесина				
Прессованная (без пропитки)	—	—	0,050	0,061
Пропитанная маслом индустриальным 45	—	—	0,100	0,080
Пропитанная моторным маслом	—	—	0,025	0.076
Пропитанная фторопластом Ф-4	—	—	0,70	0,074
Пропитанная церезином	—	—	0,070	0,038
Пропитанная церезином и стеариновой кислотой	—	—	0,135	0,028
Резина				
	—	—	0,250	0,010
Кожевенный полуфабрикат				
В сырье	—	—	$0{,}22 \cdot 10^{-4}$	0,016
В голье	—	—	$0{,}20 \cdot 10^{-4}$	0,014
В дубленом виде	—	—	$1{,}7 \cdot 10^{-4}$	0,080
Синтетический алмаз по стали				
30ХГСА	340	0,125	20,06	0,066
45	270	0,119	20,39	0,044
08Х18Н9Т	159	0,15	3,18	0,130
40Х	341	0,109	18,41	0,055
45	324	0,112	12,96	0,072
Трение со смазкой				
Сталь 30ХГСА при смазке:				
ЦИАТИМ-201	—	0,045	0,1	0,04
АК-6	—	0,095	0,1	0,10
вазелиновое масло	—	0,100	1,0	0,12
керосин	—	0,123	1,65	0,11
Бр.Б2 при смазке:				
ЦИАТИМ-201	—	0,032	0,05	0,03
АК-6	—	0,063	0,10	0,06
вазелиновое масло	—	0,070	0,10	0,07
керосин	—	0,073	0,70	0,06
Бр.АЖМЦ 10-3-1,5 при смазке:				
ЦИАТИМ-201	—	0,340	0,05	0,032
АК-6	—	0,075	0,10	0,073
вазелиновое масло	—	0,08	0,10	0,078
керосин	—	0,10	0,10	0,10

6.3. ТРЕНИЕ ПОКОЯ (табл. 6.3—6.6)

Таблица 6.3. **Коэффициент трения покоя (сцепления) [1]**

Материал	f_s
Металлы по металлу:	
тщательно очищенные от окисных пленок	100
несмазанные на воздухе	1,0
смазанные минеральным маслом	0,2—0,4
смазанные животным и растительными маслами	0,1
Сплавы, трущиеся по стали:	
медно-свинцовый, несмазанный	0,2
медно-свинцовый, смазанный минеральным маслом	0,1
Белый металл, сплав Вуда:	
несмазанный	0,7
смазанный минеральным маслом	0,1
Фосфористая бронза, латунь:	
несмазанная	0,35
смазанная минеральным маслом	0,15—0,2
Обычное железо:	
несмазанное	0,4
смазанное минеральным маслом	0,1—0,2
Стальные поверхности высокой твердости при смазке:	
растительное и животное масло	0,08—0,1
минеральное масло	0,12
дисульфид молибдена	0,1
олеиновая кислота	0,08
спирт, бензин	0,4
глицерин	0,2
несмазанные	0,6
Тонкие металлические пленки на твердом основании:	
пленка индия толщиной 10^{-3} — 10^{-4} см	0,08
свинцовые пленки	0,15
медные пленки	0,3
Неметаллические материалы:	
стекло по стеклу, очищенные	1
смазанные жидкими углеводородами, жирными кислотами	0,3—0,6
смазанные твердыми углеводородами, жирными кислотами	0,1
Драгоценные камни:	
алмаз по алмазу (очищенные и дегазированные)	0,4
очищенные на воздухе	0,1
смазанные	0,05—0,1
Сапфир по сапфиру:	
очищенные и дегазированные	0,6
на воздухе, очищенные	0,2
на воздухе, смазанные	0,15—0,2
Графит по графиту:	
очищенные и дегазированные	0,5—0,8
на воздухе, очищенные	0,1
на воздухе, смазанные	0,1
графит по стали, очищенный и смазанный	0,1
очищенная каменная соль по каменной соли	0,8
Нитрат соды по нитрату соды:	
очищенные	0,5
смазанные	0,12

Продолжение табл. 6.3

Материал	f_s
Лед по льду:	
ниже —50 °С	0,5
между 0 и —20 °С	0,05—0,1
Карбид вольфрама по стали:	
очищенные	0,4—0,6
смазанные	0,1—0,2
Пластмассы:	
перспекс, политен по перспексу, политену, очищенные	0,8
по стали, очищенные	0,3—0,5
нейлон по нейлону	0,5
ПТФЭ по ПТФЭ	0,04—0,1
по стали	0,04—0,1
Натуральные волокна:	
шерстяное волокно по роговине очищенное	$f_2=0,8\div0,1$
(f_2 — против ворса, f_1 — по ворсу)	$f_1=0,4\div0,6$
смазанное	$f_2=0,5\div0,3$
	$f_1=0,3\div0,4$
Натуральные волокна в состоянии поставки:	
хлопок по хлопку (нить)	0,3
по хлопку (хлопковая вата)	0,6
шелк по шелку	0,2—0,3
Дерево по дереву:	
очищенное сухое	0,25—0,5
очищенное влажное	0,2
Дерево по металлу:	
очищенное сухое	0,2—0,6
очищенное влажное	0,2
Дерево по кирпичу, очищенное сухое	0,3—0,4
Кожа по металлу:	
очищенная сухая	0,6
очищенная влажная	0,4
очищенная смазанная	0,2
Тормозной материал по чугуну:	
очищенный	0,4
влажный	0,2
смазанный	0,1

Таблица 6.4. **Трение покоя сплавов по стали без смазки [11]**

Сплав	f	Сплав	f
Медно-свинцовый (деидритный)	0,22	Алюминиевая бронза	0,45
Медно-свинцовый (недендритный)	0,22	Латунь	0,35
		Констаитан	0,4
Оловянный баббит	0,8	Сталь	0,8
Свинцовый баббит	0,55	Чугун	0,4
Сплав Вуда	0,7		
Фосфористая бронза	0,35		

Таблица 6.5. **Трение покоя смазанных металлов по стали [11]**

Несущая поверхность	Сурепное масло	Касторовое масло	Минеральное масло	Жирные кислоты
Твердая сталь	0,14	0,12	0,16	0,09
Чугун	0,11	0,15	0,21	—
Ружейная сталь	0,15	0,16	0,21	—
Бронза	0,12	0,12	0,16	—
Чистый свинец	—	—	0,5	0,22
Свинцовый баббит	—	—	0,1	0,08
Чистое олово	—	—	0,6	0,21
Оловянный баббит	—	—	0,11	0,07
Спеченная бронза	—	—	0,13	—
Латунь	—	0,11	0,19	0,13

Таблица 6.6. **Трение покоя льда по льду [11]**

t, °С	0	—12	—71	—82	—110
f	0,05—0,15	0,3	0,5	0,5	0,5

6.4 ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ БЕЗ СМАЗЫВАНИЯ (табл. 6.7—6.12)

Таблица 6.7. **Ориентировочные значения коэффициента трения скольжения несмазаных материалов [5]**

Материал	f
Сталь по:	
стали	0,15—0,18
чугуну	0,15—0,18
бронзе	0,16—0,20
Бронза по бронзе	0,2
Дерево по бронзе	0,3
Чугун по чугуну	0,10—0,21
Железо по:	
железу	0,44
чугуну	0,17—0,18
Кожа по чугуну	0,2—0,4
Резина по чугуну	0,5—0,8
Бумага по чугуну	0,15—0,4
Дерево по чугуну	0,25—0,5
Ферродо по металлу	0,3—0,55
Фибра по металлу	0,4—0,8
Железо по:	
бронзе	0,15
дубу	0,48
Дерево по дереву:	
вдоль волокон	0,48
поперек волокон	0,34
Сталь по льду	0,014
Целлофан по:	
стали	0,27—0,29
чугуну	0,30—0,37
оберточной бумаге	0,3—0,4
миллиметровке	0,35—0,38
писчей бумаге	0,45
целлофану	0,38—0,40
коже	0,43—0,44
резине	0,95

Таблица 6.8. **Значения коэффициента трения при скольжении без смазывания гладкообработанных поверхностей [5]**

Материал	f	Материал	f
Сталь конструкционная по:		латуни Л62	0,16
стали конструкционной	0,18	дуралюмину	0,21
бронзе оловянистой	0,16	Сталь нитрованная (35ХМЮА) по:	
латуни Л62	0,19	стали закаленной	0,24
чугуну серому	0,19	текстолиту	0,36
стали закаленной	0,16	гетинаксу	0,24
алюминию	0,18	фибре	0,30
дуралюмину	0,20	Латунь (Л59, Л62) по:	
электрону	0,15	бронзе оловянистой	0.16
меди красной	0,15	латуни	0,17
текстолиту	0,22	чугуну серому	0,16
гетинаксу	0,20	дуралюмину	0,22
фибре	0,30	меди	0,30
эбониту	0,25	алюминию	0,17
Сталь закаленная инструментальная по:		текстолиту	0,30
стали закаленной	0,17	фибре	0,32
бронзе оловянистой	0,15	Бронза оловянистая по:	
электрону	0,14	бронзе оловянистой	0,20
агату	0,22	чугуну серому	0,21
корунду	0,16	текстолиту	0,23
меди красной	0,15	фибре	0,27
текстолиту	0,27	эбониту	0,43
фибре	0,22	Дуралюмин по:	
Сталь хромоникелевая по:		дуралюмину	0,22
стали конструкционной	0,15	меди красной	0,30
Сталь хромоникелевая по:		текстолиту	0,40
стали хромоникелевой	0,18	фибре	0,33
		Чугун серый по:	
		чугуну серому	0,22
		фибре	0,31

Таблица 6.9. **Коэффициент трения без смазки феноловых армированных пластмасс по стали [2]**

Материал	Армирующий материал	f
Текстолит	Хлопчатобумажная ткань	0,3
Волокнит	Хлопковое волокно	0,33
Стекловолокнит	Стеклянное волокно	0,34
Асботекстолит	Асбестовая ткань	0,34—0,38
Фенолит	Графит, капрон и др.	0,2

Таблица 6.10. **Коэффициенты трения полимерных и древесных материалов при трении по стали [9]**

Материал	f
Материалы на основе полимеров:	
термопластичные	0,15—0,40
термореактивные	0,1—0,4
Углеграфитные материалы	0,2—0,35
Металлокерамические материалы	0,25—0,40
Ленточные (слоистые) материалы	0,1—0,15
Прессованная древесина, пропитанная церезином	0,08—0,1
Углепласты, углеграфиты:	
без смазки	0,1—0,3
со смазкой	0,01—0,1
Древесина, наполненная:	
раствором полиэтилена в масле МС-20, АПД-1	0,08—0,12
синтетическим связующим	0,08—0,14
стеаратом (Ц) в моторном масле	0,06—0,12
стеаратом (Ц) в кремнийорганическом соединении	0,09—0,12
солями меди и их оксидами и глицерином АПД-2	0,03—0,04

Таблица 6.11. **Коэффициент трения для стали из опытов с наклонной плоскостью [5]**

Материал	f
По агату	0,1
гранату	0,22
сапфиру	0,25
стеклу	0,12—0,14
синтетическому рубину	0,16
рубину	0,29

Таблица 6.12. **Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения [9]**

Материал	v, м/с					
	50	100	200	300	400	500
Сталь (магнитно-рельсовый тормоз)	0,04	—	—	—	—	—
Висмут	0,12	0,07	0,04	—	—	—
Сурьма	0,25	0,18	0,14	0,1	0,07	—
Сталь	0,12	0,10	0,08	0,06	0,05	0,04
Медь	0,23	0,17	0,12	0,09	0,08	0,07
Карбид титана	0,22	0,16	0,11	0,08	0,06	0,05
Оксид алюминия	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,1
Сталь 10	0,05	0,035	0,03	0,025	0,022	0,02

6.5. ТРЕНИЕ СМАЗАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ (табл. 6.13—6.19)

Таблица 6.13. **Ориентировочные значения коэффициента трения при основных видах смазанного контакта [8]**

Вид фрикционного взаимодействия	f
Сдвиг пленки смазки	0,0003
Граничная смазка	0,02—0,01
Гидродинамические радиальные подшипники	0,005

Таблица 6.14. **Коэффициент трения смазанных стальных поверхностей при комнатной температуре [11]**

Смазочный материал	Длина молекулярной цепи	Точка плавления, °С	f	Температура фазового перехода, °С
Парафины				
Нонан	C_9	—54	0,26	
Декан	C_{10}	—30	0,23	
Гексадекан	C_{16}	17	0,16	17
Докозан	C_{22}	44	0,11	44
Триаконтан	C_{30}	66	0,11	66
Спирты				
Бутиловый	C_4	—89	0,3	
Октиловый	C_8	—16	0,23	
Деканоловый	C_{10}	7	0,16	
Цетиловый	C_{16}	49	0,10	
Жирные кислоты				
Уксусная	C_2	16	0,5	
Пропионовая	C_3	—22	0,4	
Валериановая	C_5	—35	0,17	
Капроновая	C_6	—2	0,12	80
Пеларгоновая	C_9	12	0,11	90
Каприновая	C_{10}	31	0,11	95
Лауриновая	C_{12}	44	0,11	120
Миристиновая	C_{14}	58	0,11	125
Пальмитиновая	C_{16}	64	0,11	130
Стеариновая	C_{18}	69	0,10	140

Таблица 6.15. **Коэффициент трения некоторых материалов по нержавеющей стали в среде криогенных жидкостей [9]**

Материал	Жидкая среда		Материал	Жидкая среда	
	Азот	Водород		Азот	Водород
Графитофтористый металл	0,18	0,22	Графит (15%)+фторопласт-4 (85%)	0,09	0,16
Графит + фенол	0,04	0,06	Графит (5%) + найлон (95%)	0,06	0,15

Таблица 6.16. **Ориентировочные значения коэффициента трения материалов для подшипников скольжения по стали при смешанной и несовершенной смазке [7]**

Материалы	НВ, 10^7 Па	f
Бронзы		
Бр. ОЦСН-3-7-5-1	65	0,013—0,016
Бр. ОЦС 3-12-5	60	0,01—0,015
Бр. ОЦС 5-5-5	60—75	0,009
Бр. ОЦС 6-6-3	60	0,009
Бр. ОЦС 4-4-2,5	60	0,016
Бр. ОЦС 4-4-4	62	0,016
Бр. ОЦ 10-2	75—90	0,008—0,060
Бр. ОФ 10-1	80—100	0,008—0,180
Бр. ОФ 7-0,2	75	0,01
Бр. ОФ 6-5-0,15	70—90	0,12
Бр. нМЦ 3-1	90	0,015
Бр. АМЦ 9-2	160	0,006—0,012
Бр. АМЦ 10-2	110	0,006
Бр. АЖ 9-4Л	120—140	0,012—0,040
Бр. АЖ 9-4	110—160	0,012—0,040
Бр. АЖМЦ 10-3-1,5	120—140	0,012
Бр. АМЦ 9-2Л	90—120	0,012
Бр. АЖН 10-4-4Л	140—160	0,006—0,012
Бр. АЖН 11-6-6	250	0,011
Бр. С30	25	0,008
ЛС 59-1Л	90—40	0,014
ЛК 80-3Л	90—110	0,01—0,19
Бр. Б2	100	0,016—0,05
Баббиты		
Б6	32	0,005
Б16	30	0,006
Б83	27—30	0,005
БН	27—29	0,006
БТ	26	0,009
БКА	32	0,004
Углеродные материалы		
АМС-1	40	0,1
АМС-3	35	0,065
АФ-3Т	46	0,087
АГ 1500СО5	65—70 (по Шору)	0,063
Порошковые и керамические материалы		
ЖГР-1-20	60—100	0,06—0,09
ЖГР-2-20	50—80	0,06—0,09
ЖГР-3-Д	70—100	0,04—0,07
АЖГр-6-3	20—24	0,005—0,008
Бр. ОГ10-2	18—20	0,004—0,008
Самосмазывающиеся полимерные материалы		
АМАН-2	29—31	0,12
АМАН-4	27—29	0,1
Эстеран-33	22	0,08
АМАН-7	18—20	0,05
АМАН-13	14—16	0,16
АФ-3ам ($p = 0,2$ МПа; $v = 2$ м/с)	28—30	0,12
Пластмассы		
Полиамиды:		
П-610	10—15*1	0,26—0,32
Капрои	8—12	0,1—0,15
П-АК-93/7	10—12*1	0,24—0,25

Продолжение табл. 6.16

Материалы	НВ	f
Полиимиды:		
ПМ-67	20—30	0,35*2
ПМ-69	20—27	0,40*2
ПАМ 15-69	33	0,18*2
Полиолефины		
Фторопласт-4	3—6	0,03—0,1
Пентапласт		0,12
Поликарбонаты днфлон литьевой	10—11	0,3*2
Полнакрилаты	20	0,4*2

*1 Твердость определена при нагрузке на индентор 365 Н.
*2 Значения определены при отсутствии смазочного материала.

Таблица 6.17. **Коэффициент трения в проточной воде [5] ($p = 0{,}06$ МПа; $v = 6$ м/с)**

Материал	f
Бук и клен по бронзе при движении:	
параллельно волокнам	0,25—0,26
перпендикулярно волокнам	0,12—0,23
Эбонит по бронзе	0,08—0,12
Латунь по бронзе	0,25—0,35
Сталь по бронзе	0,07—0,10
Сталь с хромированной поверхностью по бронзе	0,06
Бронза по бронзе	0,04
Резина	0,22—0,26
Текстолит по бронзе	0,12—0,14

Таблица 6.18. **Коэффициент трения по стали графита и нитрида бора при использовании их в качестве твердосмазочных покрытий [9]**

Материал	f		Давление, Па
	Воздух	Вакуум	
Природный графит	0,19	0,44	$8 \cdot 10^{-7}$
Пиролитический графит	0,18	0,50	$2{,}7 \cdot 10^{-7}$
Нитрид бора горячего прессования	0,25	0,70	$2{,}7 \cdot 10^{-7}$

Таблица 6.19. **Коэффициенты трения покоя f_s и движения f материалов с рабочим слоем твердой смазки при трении по стали [9]**

Материал	Режим трения (давление, скорость)	10^5 Па		$3 \cdot 10^{-4}$ Па	
		f_s	f	f_s	f
АМАН-2	0,2 МПа; 4 м/с	0,44	0,18	0,1	0,1
М-801 (Mo—MoS_2—Mo)	0,78 МПа; 0,265 м/с	0,4—0,5	0,1	0,15	0,5
Mo—$MoSe_2$	0,03—0,3 МПа; 0,02 м/с	0,13	0,12	0,1	0,1

6.6. ТРЕНИЕ ПО ЛЬДУ И СНЕГУ (табл. 6.20—6.22)

Таблица 6.20. **Коэффициент трения по льду и снегу [8]**

Вид трения	f
По мокрому льду	0,02
По гладкому льду	0,06
Лыжи по снегу	0,10—0,30
По шероховатому льду	0,12
По плотному снегу	0,20

Таблица 6.21. **Коэффициент трения по льду при скорости 4 м/с [11]**

Материал	t, °C					
	0	—10	—20	—40	—60	—80
Лед	0,02	0,035	0,050	0,075	0,085	0,09
Эбонит	0,02	0,050	0,065	0,085	0,100	0,11
Латунь	0,02	0,075	0,085	0,115	0,140	0,15

Примечание. Для несмазанной лыжи при —3 °С $f = 0{,}08$, для смазанной $f = 0{,}03$.

Таблица 6.22. **Коэффициент трения по снегу смазанной (вощеной) лыжи при скорости 0,1 м/с [11]**

t, °C	0	—3	—10	—40
f	0,04	0,09	0,18	0,4

6.7. ТРЕНИЕ В ВАКУУМЕ (табл. 6.23—6.26)

Таблица 6.23. **Коэффициент трения стали 12Х18Н10Т в паре с другими сталями в условиях вакуума [9]**

Сталь	Давление P, Па	Система откачки	t, °C	τ_0, 10^7 Па	β
Р9	—	—	—	6,43	0,232
У7	$6{,}5 \cdot 10^{-4}$	Масляная	—	2,54	0,32
40Х13	—	—	20	3,95	0,26
ШХ15	$6{,}5 \cdot 10^{-1}$	—	—	5,75	0,159
Р9	$6{,}5 \cdot 10^{-7}$	Безмасляная	—	9,65	0,575
Р9	$4 \cdot 10^{-5}$	—	200	9,65	0,545

Таблица 6.24. **Трение чистых металлов при однократном скольжении на воздухе и в вакууме 10^{-3} Па [9]**

Пары трения	Коэффициент трения		Пары трения	Коэффициент трения	
	на воздухе	в вакууме после обезгаживания		на воздухе	в вакууме после обезгаживания
Cu — Ni	0,45	1,50	Cu — Fe	0,51	0,75
Ta — Ni	0,23	0,90	Ta — Cu	0,44	0,43
W — Ni	0,21	1,36	W — Cu	0,34	0,41

Таблица 6.25. **Влияние остаточного давления в испытательной камере на коэффициент трения нержавеющей стали в одноименной паре**

Остаточное давление, Па	10^5	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}
Коэффициент трения	0,47	1,22	2,74	2,94

Таблица 6.26. **Коэффициент трения металлов, дегазированных в вакууме [11]**

Металл	Дегазированный металл	Металл после обработки	Металл после контакта с O_2
Никель по вольфраму	6	6	1
Никель по никелю	5—8	5	2,5
Медь по меди	4,8	4,8	0,7
Золото по золоту	4,5	4,5	2,8

6.8. ТРЕНИЕ КАЧЕНИЯ (табл. 6.27—6.29)

Таблица 6.27. **Ориентировочные значения коэффициента трения качения [8]**

Трущиеся сопряжения	$f_к$
Подшипники качения	0,0025
Сопротивление свободному качению шин	0,01
Качение шара по резине	0,02—0,10
Трение между колесом и рельсом:	
во влажную погоду	0,09—0,15
в дождь	0,20
в сухую погоду	0,25—0,30
Качение цилиндра по резине	0,10—0,30
Шины:	
на мокрых дорогах	0,40
на сухих дорогах	0,70

Таблица 6.28. **Коэффициент трения качения, определенный стандартным методом [12] по затуханию колебаний маятника со сферической опорой из стали ШХ15 [14]**

Материал	$f_к$
Сталь ШХ15	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$
Сталь ШХ15, необезжиренная	$2 \cdot 10^{-5}$
Медь	$6 \cdot 10^{-4}$
Стекло	$5 \cdot 10^{-5}$
Кремний	$3 \cdot 10^{-5}$

Таблица 6.29. **Значения коэффициента гистерезисных потерь [13] для ряда материалов, определенные стандартным [12] методом**

Материал	$c \cdot 10^3$	
	в исходном состоянии	отожженный
Кварц	0,006	—
Резина	0,1	—
Оргстекло	0,2	—
Манганин	0,31	0,016
Копель	0,31	0,1
Рений	0,33	0,024
Никель-титановый сплав	0,41	0,43
Алюмель	0,9	0,07
Хромель	0,95	0,87
Вольфрам	1,0	0,18—0,35
Бериллиевая бронза	1,0	0,57
Нихром	1,2	0,01
Сталь	1,2	0,42
Эленвар	1,3	3,1
Серебро	1,6	31
Алюминий	6,3	2,1
Медь	7,8	3,1
Константан	31.4	10

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боуден Ф. П., Тейбор Д.** Трение и смазка. М.: Машгиз. 1960.
2. **Воронков Б. Д.** Подшипники сухого трения. Л.: Машиностроение. 1971.
3. **ГОСТ 23.002-78.** Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.
4. **ГОСТ 23.202-78.** Обеспечение износостойкости изделий. Метод определения прочности адгезионной связи твердых тел при трении.
5. **Зайцев А. К.** Основы учения о трении, износе и смазке машин. М.-Л.: Машгиз. 1947.
6. **Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.** Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение. 1977.
7. **Крагельский И. В., Михин Н. М.** Узлы трения машин: Справочник. М.: Машиностроение. 1984.
8. **Мур Д.** Основы и применение трибоники: Пер. с англ. М.: Мир. 1978.
9. **Трение,** изнашивание и смазка: Справочник. М.: Машиностроение. 1978. Кн. 1.
10. **Физический** энциклопедический словарь/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия. 1984.
11. **Bowden F. P., Tabor D.** The friction and lubrication of solids. Oxford: Clarendon Press. 1954. Pt. 1. P. 372—384.
12. **ГОСТ 23.214-83.** Обеспечение износостойкости изделий. Маятниковый метод измерения коэффициента трения качения.
13. **Карагиоз О. В., Кочерян Э. Г., Измайлов В. П.** Увеличение добротности вакуумированных крутильных систем путем отжига нити подвеса//Физ. и хим. обработки материалов. 1972. № 1. С. 87—90.
14. **Силин А. А., Карагиоз О. В., Маркачов В. В., Измайлов В. П.** О единстве механизма диссипации энергии при трении качения и других видах упругого деформирования твердых тел//Трение и износ. 1980. Т. 1, № 6. С. 957—964.

ГЛАВА 7
АКУСТИКА

Л. К. Заремба

7.1. ВВЕДЕНИЕ

Скорость звука в газах и жидкостях, м/с,

$$v_0 = \left(k_S \rho_0\right)^{-1/2},$$

где ρ_0 — невозмущенная плотность среды, кг/м^3; k_s — адиабатный коэффициент сжатия, Па$^{-1}$. В газах

$$k_S = (\gamma p_0)^{-1},$$

где p_0 — среднее давление в среде, Па, $\gamma = c_p/c_v$ — отношение теплоемкостей. Для жидкостей k_s — эмпирический параметр. Разложение уравнения состояния $p = p(\rho)$ в ряд по малым степеням сжатия $s = (\rho - \rho_0)/\rho_0$ дает

$$p = p_0 + \rho_0 v_0^2 \left[s + (n-1)\frac{s^2}{2} + \ldots \right], \quad \text{где}$$

$$n = \frac{\rho_0}{v_0^2}\left.\frac{dv^2}{d\rho}\right|_{\rho=\rho_0}$$ — адиабатический параметр квадратичной нелинейности (для газов $\gamma \equiv n$, для жидкостей часто используется нелинейный параметр $B/A = n-1$); $v = v(\rho)$ — локальная скорость звука. В однородных газах и жидкостях, за исключением областей релаксации, дисперсия скорости звука мала; в области релаксации она может достигать нескольких десятков процентов. Во всех жидкостях вплоть до давлений $\sim 10^2$ МПа скорость линейно растет с давлением. Почти во всех жидкостях (за исключением воды, некоторых расплавов металлов) скорость убывает с ростом температуры: $-dv_0/dT = 2 \div 6$ м/(К·с).

В изотропных твердых телах скорость продольных волн v_l

$$\rho_0 v_l^2 = \tilde{\lambda} + 2G = K + \frac{4}{3}G =$$

$$= \frac{G(4G-E)}{3G-E} = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} = \frac{3K(1-\mu)}{1+\mu};$$

поперечных (сдвиговых) или крутильных волн v_s

$$\rho_0 v_s^2 = G = \frac{E}{2(1+\mu)} = \frac{3K(1-\mu)}{2(1+\mu)},$$

где $\tilde{\lambda}$ — постоянная Ляме, Па; G — модуль сдвига, Па; K — модуль объемной упругости, Па; E — модуль Юнга, Па; μ — коэффициент Пуассона (все параметры адиабатические). При распространении в твердых волноводах в общем случае имеется сильная дисперсия; например, для изгибной волны в пластине толщиной d, м,

$$v_{изг}^2 = \pi d f \left[\frac{E}{3\rho_0 (1-\mu)^2} \right]^{1/2}$$

где f — частота, Гц. Для нулевой моды продольных колебаний тонкого (диаметр $D \ll \lambda$ — длины волны) стержня дисперсия отсутствует:

$$\rho_0 v_{ст}^2 = E.$$

При колебаниях пластинки по толщине оценку первой резонансной частоты можно сделать по соотношению

$$f_p = v/2L,$$

где L — толщина пластинки, м; v — скорость соответствующей волны, м/с.

На свободной поверхности твердого тела могут распространяться недиспергирующие релеевские поверхностные акустические волны (ПАВ), скорость которых для изотропного тела $v_R = a v_s$, где $a = (0{,}87 + 1{,}12\mu)/(1+\mu) < 1$. Колебательные смещения из положения равновесия в этих ПАВ поляризованы в плоскости, нормальной к поверхности, содержащей волновой вектор. Деформации носят смешанный характер (объемные и сдвиговые). Глубина проникновения релеевских ПАВ порядка λ.

В произвольном направлении в кристаллах в общем случае могут распространяться три объемные волны: квазипродольная (QL) и две квазипоперечные — быстрая (FS) и медленная (SS) со скоростью $\rho_0 v^2 = M$, где M — действующий адиабатический модуль упругости, зависящий от направления распространения и поляризации волны. В таблицах нижний индекс — направление распространения, верхний — поляризация (направление колебательного смещения). В кубических кристаллах действующий модуль для разных типов волн:

$$L_{100}: M = c_{11}; \qquad S_{100}: M = c_{44};$$

$$L_{110}: M = \frac{1}{2}\left(c_{11} + c_{12} + 2c_{44}\right); \qquad S_{110}^{001}: M = c_{44};$$

$$L_{111}: M = \frac{1}{3}\left(c_{11} + 2c_{12} + 4c_{44}\right);$$

$$S_{110}^{1\bar{1}0}: M = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}),$$

где c_{ij} — упругие постоянные кристалла. Для пьезоэлектрических (магнитных) кристаллов есть соответствующие добавки к v; металлизация поверхности приводит к изменению скорости релеевской ПАВ: $\Delta v_R/v_R \simeq \kappa^2/2$, где κ — коэффициент электромеханической связи, определяющий долю связанной электроупругой энергии. На поверхности пьезоэлектрика может распространяться сдвиговая ПАВ Гуляева — Блюстейна, глубина проникновения которой порядка нескольких десятков λ. В кристаллах с сильной анизотропией скорости направление потока энергии не совпадает с направлением нормали к волновому фронту, что приводит к несовпадению по направлению и величине фазовой и групповой скоростей.

Точность прецизионных измерений абсолютного значения скорости звука в настоящее время высока (погрешность $\sim 10^{-6}$). Однако такие результаты могут рассматриваться лишь для однородных чистых образцов (в кристаллах важна еще точность ориентации).

Отражение, преломление, прохождение. Коэффициент отражения по энергии плоской волны от границы раздела сред с удельными волновыми сопротивлениями $z_1 = \rho_1 v_1$ и $z_2 = \rho_2 v_2$

$$R = \left(\frac{z_1 \cos\theta_2 - z_2 \cos\theta_1}{z_1 \cos\theta_2 + z_2 \cos\theta_1} \right)^2,$$

где θ_1 — угол падения; θ_2 — угол преломления ($v_1 \sin\theta_2 = v_2 \sin\theta_1$). Коэффициент прохождения $T = 1 - R$; амплитудные коэффициенты $r = R^{1/2}$, $t = T^{1/2}$.

Затухание. Для плоской волны коэффициент затухания по амплитуде α, м$^{-1}$, может быть представлен в виде

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \left[\frac{p(0)}{p(L)} \right],$$

где $p(0)$, $p(L)$ — амплитуды звукового давления в исходной точке и на расстоянии L, м. Иногда для измерения α используют единицу дБ/м, в этом случае

$$\alpha = \frac{1}{L} 20 \lg \frac{p(0)}{p(L)} .$$

Связь этих коэффициентов затухания: α (дБ/м) = =8,686 α (м$^{-1}$). Часто используется временной коэффициент затухания Γ, с$^{-1}$: $\Gamma=\alpha v$, где α выражено в м$^{-1}$, v в м/с, для Γ в дБ/мкс: $\Gamma=8{,}686\cdot10^{-6}\alpha v$. Помимо α и Γ характеристиками затухания являются безразмерные добротность $Q=\pi f/\alpha v$ и логарифмический декремент затухания $\delta=\pi/Q$. В отличие от затухания, включающего рассеяние звука на неоднородностях и другие виды недиссипативных потерь, поглощение включает лишь диссипативные потери. Для газов и жидкостей коэффициент поглощения α, м$^{-1}$,

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho_0 v^3}\left(\frac{4}{3}\eta + \eta' + \frac{\gamma-1}{c_p}\varkappa\right) = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho_0 v^3} b,$$

где ρ_0 — плотность, кг/м^3; f — частота, Гц; η — динамическая вязкость, Па·с; η' — коэффициент объемной вязкости, Па·с; v — скорость звука, м/с; $\varkappa$ — коэффициент теплопроводности, Вт/(К·м); c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(К·г). Для сжиженных газов, расплавленных металлов, ртути $\eta'\approx0$. Во всех остальных случаях η' — экспериментально определяемая величина, обусловленная релаксационными процессами в среде. Вне области релаксации α/f^2=const; в области релаксации $\alpha\lambda$ имеет максимум, а α/f^2 характерно (в виде плавной «ступеньки») уменьшается с частотой. Увеличение амплитуды волны сопровождается ростом затухания из-за более быстрого поглощения возникающих в волне высших гармоник; это нелинейное затухание становится заметным при амплитудах звукового давления в плоской волне: $p'>2\pi fb$.

В поликристаллических твердых телах имеется много механизмов затухания (рассеяние на зернах, теплопроводность между зернами и др.); затухание сильно зависит от структуры. В высококачественных кристаллах диэлектриков в области комнатных температур затухание определяется взаимодействием звука с тепловыми фононами (затухание Ландау — Румера для ВЧ-звука и Ахиезера для более низких частот); при $T\leqslant3\div40$ К независимое от температуры остаточное затухание обусловлено взаимодействием с дефектами. В металлах и полупроводниках (особенно пьезополупроводниках) имеется электронное затухание, особенно четко проявляющееся в области низких температур и исчезающее при переходе в сверхпроводящее состояние. В магнитных материалах и кристаллах значительное поглощение обусловлено взаимодействием с доменными стенками и спиновыми возбуждениями. Частотная зависимость затухания носит, как правило, сложный характер. В высококачественных кристаллах в области высоких ультразвуковых и гиперзвуковых частот для объемных волн эта зависимость часто бывает квадратичной. В поликристаллических материалах в области низких ультразвуковых частот часто Q=const и α/f=const. В области фазовых переходов затухание резко увеличивается. Увеличение амплитуды звука сопровождается, как правило, увеличением затухания (амплитудно-зависимое затухание).

Наиболее точные измерения затухания имеют погрешность несколько процентов; большинство измерений, однако, проведено с погрешностью 10—20%. Из-за чувствительности затухания к структурным и примесным особенностям образцов различие в результатах разных авторов может существенно превышать указанную погрешность. С общими вопросами акустики можно ознакомиться по [1, 4, 33, 48, 87, 132, 135, 136, 141].

7.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ГАЗАХ И ПАРАХ (табл. 7.1—7.4, рис. 7.1—7.12)

Таблица 7.1. **Скорость звука в газах и парах**

Вещество	t, °С	f, кГц	v, м/с	$\Delta v/\Delta t$, м/(К·с)	Литература
Азот	0	—	334,0	0,6	[2]
	19,1	—	349,0	—	[2]
Аргон	0	—	319,0	0,56	[2]
	20	—	321	—	[2]
	30,2	83,8	325,23	—	[3]
Аммиак	0	—	415	—	[2]
	18	—	428,2	—	[2]
Амиловый спирт	136	—	218,8	—	[2]
Ацеталь	30	59,6	257	—	[2]
Ацетон	18	—	327	—	[2]
	97,1	—	238,6	0,32	[4]
	134	—	251,2	—	[4]
Бензол	97,1	—	202,0	0,3	[5]
	134	95	212,6	—	[2]
Бромистый водород	0	—	200	—	[5]
Бром	0	—	135	—	[2]
Бутиловый спирт:					
вторичный	134	95	215	—	[2]
третичный	134	95	180	—	[2]
Воздух	0	—	331,45	0,59	[6]
Водород	0	—	1284	2,2	[2]
	18	—	1301	—	[2]
	100	—	1463	—	[2]
Водяной пар	134	—	494	—	[5]
Винилацетат	134	—	203	—	[2]
Гелий	0	—	965	0,8	[2]
	30	83,8	1056	—	[3]
Гексан	134	94	199,6	—	[2]
Дейтерий	0	—	890	1,6	[5]
Двуокись серы	0	—	213	0,47	[2]
	20	111	221,5	—	[7]
	100	111	248,5	—	[7]
Диметиловый эфир	97,1	—	274	—	[5]
Дипропиловый эфир	97,1	—	194	—	[5]
Дихлорэтан	97,1	—	181	0,24	[5]
	134	—	190	—	[5]
Диэтиловый эфир	97,1	—	206	0,3	[5]
	134	—	217	—	[5]
Закись азота	0	—	263	0,5	[5]
	19	93,8	273	—	[7]
	109	93,8	310	—	[7]
Иодистый водород	0	—	157	—	[2]
Иодистый этил	76	465	162	—	[2]
Иодистый метил	43	465	154	—	[2]
Иод	0	—	108	—	[2]
Изопропиловый спирт	97,1	95	255	0,4	[2]
	134	95	270,2	—	[2]
Кислород	0	43,2	314	—	[1]
Криптон	30,3	83,8	224,4	—	[3]
Метан	—87	588	353	—	[8]
	—20	588	411	—	[8]
	0	—	430	—	[5]
Метиловый спирт	97,1	95	335	0,46	[2]
	134	—	352,6	—	[2]
Метилциклогексан	134	—	185	—	[2]
Метиловый эфир	97,1	95	273,9	—	[2]
Неон	0	—	433,4	—	[2]
	30,5	83,8	461,3	—	[2]
Оксид азота	10	—	324	—	[3]
	16	—	332,4	—	[2]

Продолжение табл. 7.1

Вещество	t, °С	f, кГц	v, м/с	$\Delta v/\Delta t$, м/(К·с)	Литература
Оксид углерода	0	—	338	0,6	[2]
	1000	27,4	717	—	[9]
	1800	27,4	909	—	[9]
Пентан	134	—	220	—	[2]
Пропиловый спирт	134	95	243,9	—	[2]
Пропионовая кислота	146	—	232	—	[2]
Пропиловый эфир	97,1	50	194	—	[2]
Сероуглерод	55	59,5	205	—	[2]
	97,1	50	220,1	—	[5]
Сероводород	0	—	289,3	—	[5]
Светильный газ	0	—	453	—	[5]
Углекислый газ	0	43,2	256,7	—	[2]
	20	58,5	274,6	—	[2]
	25	53	282	—	[10]
	100	53	311	—	[10]
	500	53	425	—	[10]
Фтористый кремний	0	—	167	—	[5]
Хлор	0	—	206	—	[2]
Хлористый водород	0	—	296	—	[2]
Хлористый метилен	97,1	95	204	0,24	[5]
	134	95	213	—	[5]
Хлористый этил	18	—	428,2	—	[2]
Хлороформ	97,1	95	171,4	—	[5]
	134	95	179,7	—	[2]
Циклогексан	97,1	—	191,3	0,3	[5]
	134	95	201,9	—	[2]
Четыреххлористый углерод	97,1	95	145,2	—	[5]
	134	—	153,6	—	[2]
Четырехфтористый углерод	22	—	178,2	—	[2]
Этан	10	—	308	—	[5]
Этилацетат	97,1	—	189,2	0,27	[5]
	134	95	198,8	—	[5]
Этилен	0	—	317	—	[5]
	20	59,5	329	—	[2]
Этилметилкетон	134	—	223	—	[5]
Этиловый спирт	97,1	95	269,1	0,4	[2]
	134	95	284,4	—	[2]
Этиловый эфир	97,1	—	206,5	0,3	[2]
	134	—	217,4	—	[2]

Таблица 7.2. **Зависимость скорости звука в сухом воздухе от температуры при атмосферном давлении** [11]

t, °С	−30	−20	−10	0	10	20	30	100
v, м/с	313	319	325	331,45[6]	338	344	350,70[3]	386

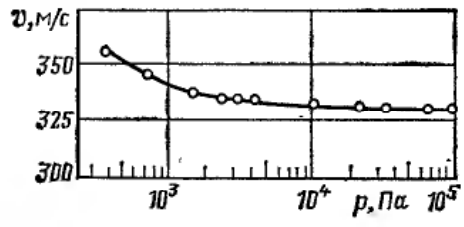


Рис. 7.1. Скорость звука в воздухе, свободном от CO_2, при атмосферном и более низком давлении (t=0°С; f=971 кГц) [12]

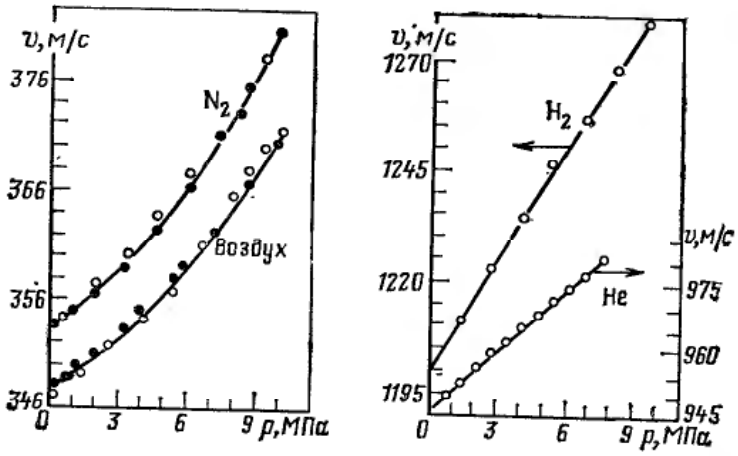


Рис. 7.2. Зависимость скорости звука в воздухе, азоте, гелии и водороде от давления [13]:
● — f=486 кГц; ○ — f=286 кГц

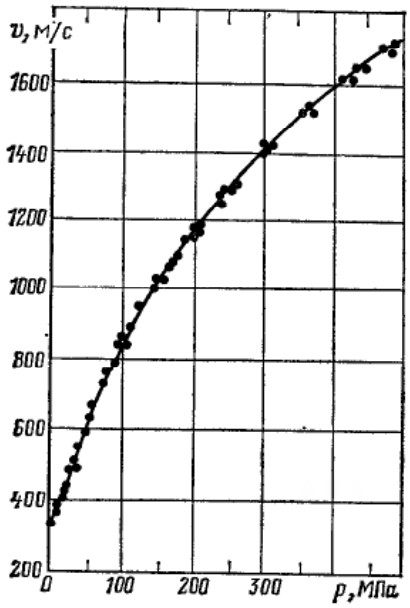


Рис. 7.3. Зависимость скорости звука в азоте от давления (t=20°С; f=310 кГц) [14]

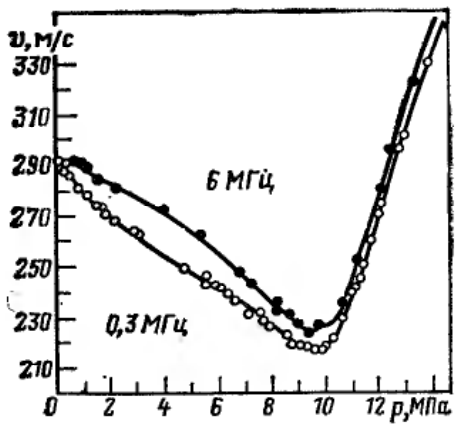


Рис. 7.4. Зависимость скорости звука в углекислом газе от давления (t=50,8 °С) [15]

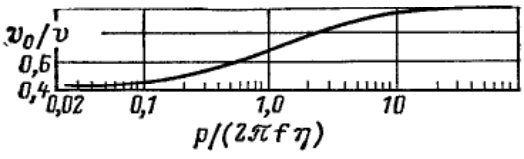


Рис. 7.5. Дисперсия скорости звука в воздухе ($f=100-\div200$ кГц) [16]

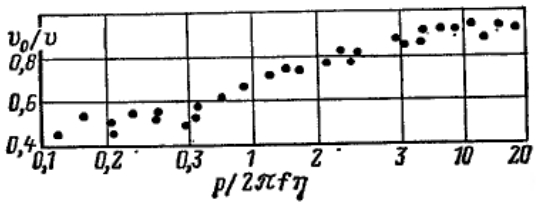


Рис. 7.6. Дисперсия скорости звука в водороде ($f=$ $=200$ кГц) [16]

Таблица 7.3. **Коэффициент затухания звука в газах и парах**

Вещество	t, °С	f, кГц	p_0, 10^5 Па	α, $м^{-1}$	α/f^2, 10^{-11} $с^2/м$	Литература
Азот	19,9	598,9	0,98	4,9	1,35	[17]
Аргон	20	4250	1,01	3,42	1,9	[18]
	—	500	0,58	8,34	—	[19]
	—	500	0,184	25,5	—	[19]
Ацетон	—	97,8	—	50	525	[2]
Бензол	—	97,8	—	100	1050	[2]
Водород	19,9	598,9	1,01	12,9	3,58	[20]
Воздух	—	1940	—	69,7	1,85	[21]
Гелий	17,5	598,9	1	10,7	2,96	[17, 20]
Иодистый метил	—	97,8	—	15	158	[2]
Иодистый этил	—	97,8	—	45	474	[2]
Кислород	19.6	598,9	1	6,0	1,68	[20]
Ксенон	—	500	0,55	—	0,15	[19]
	—	500	0,091	—	0,93	[19]
Метиловый спирт	—	97,8	—	5	52,5	[2]
Неон	19	304,4	0,66	—	5,82	[20]
Оксид азота	16,3	598,9	0,96	6,6	1,83	[20]
Оксид углерода	18,7	304,4	0,86	—	5,78	[20]
Сероуглерод	—	97,8	—	120	1270	[2]
Углекислый газ	16,6	304,4	0,99	24	27,1	[20]
Хлористый метилен	—	97,8	—	70	740	[2]
Хлороформ	—	97,8	—	70	740	[2]
Четыреххлористый углерод	—	97,8	—	35	370	[2]
Этиловый спирт	—	97,8	—	70	740	[2]
Этиловый эфир	—	97,8	—	20	210	[2]

Таблица 7.4. **Затухание звука в воздушно-водном тумане, дБ/с [22]**

f, кГц	Концентрация воды, г/м³				
	0,26	0,46	0,52	0,86	1,03
0,5	0,2	0,4	0,3	0,2	1,0
1,0	0,5	0,8	1,5	3,0	3,0
2,0	2,0	4,6	6,0	11,0	22,6
4,0	7,0	15,5	16,0	30,5	37,0
6,0	11,0	25,0	26,0	51,0	58,0

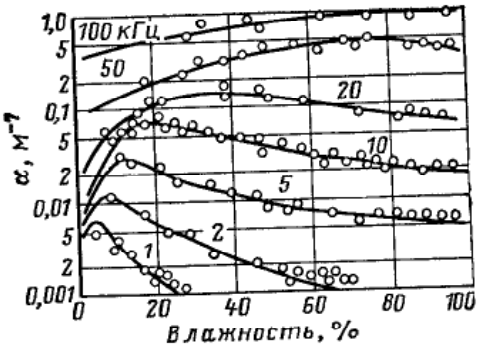


Рис. 7.7. Затухание звука в воздухе при разной частоте в зависимости от относительной влажности [23]

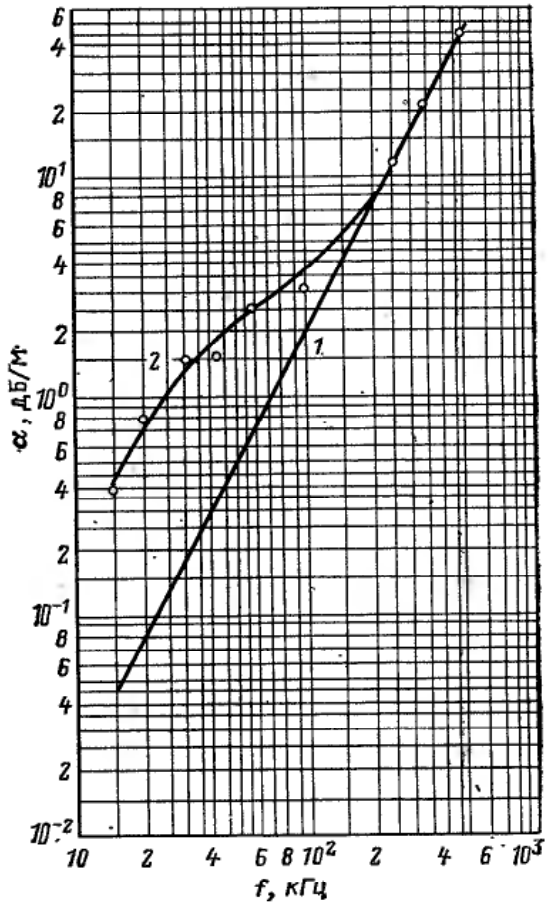


Рис. 7.8. Затухание звука на высоких звуковых и ультразвуковых частотах в сухом (*1*) и влажном (относительная влажность 37%) (*2*) воздухе при $t=26{,}5$°С [24]

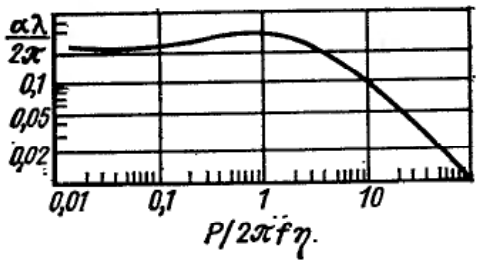


Рис. 7.9. Дисперсия коэффициента поглощения в воздухе ($f=100\div200$ кГц) [16]

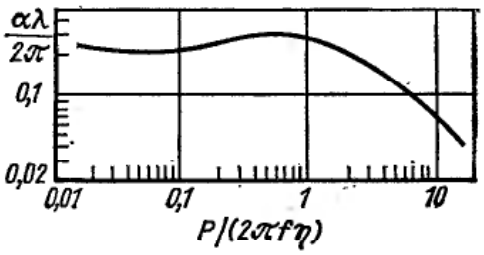


Рис. 7.10. Дисперсия коэффициента поглощения в аргоне ($f=100\div600$ кГц) [16]

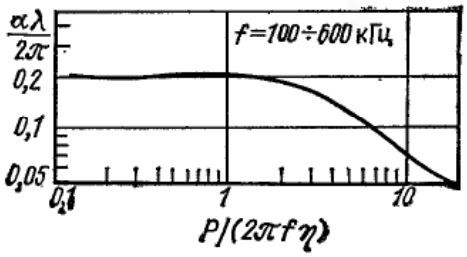


Рис. 7.11. Дисперсия коэффициента поглощения в водороде [16]

7.3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ
(табл. 7.5—7.15, рис. 7.13—7.26)

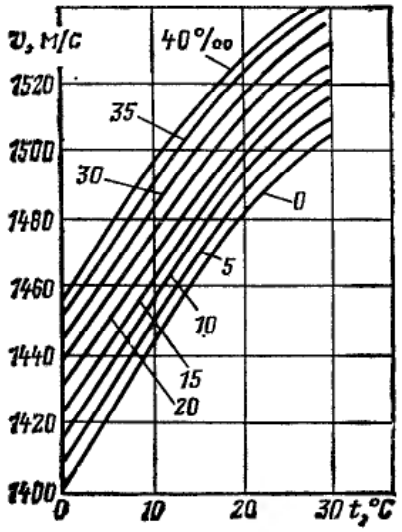


Рис. 7.12. Зависимость скорости звука в морской воде от температуры при различной концентрации солей [53]

Таблица 7.5. **Скорость звука в сжиженных газах вблизи температуры кипения**

Вещество	T, К	v, м/с	Литература	Вещество	T, К	v, м/с	Литература
Азот	65	1007	[1]	Гелий	2,18	221,7	[30]
	70	929	[25]		2,5	223,3	[30]
	76	869	[25]		3,0	220	[31]
	77	867	[1]		4,22	179,8	[30]
Аргон	64	1322	[26]		4,223	180,63	[29]
	78	1255	[26]	Гелий II	1,63	20	[32]
	84	863	[25]	(второй звук)	2,18	3,4	[32]
	87	837	[25]	Кислород	53	1130	[33]
Водород	14,8	1340	[27]		60	1119	[34]
	16,5	1265	[27]		70	1094	[34]
	18,0	1260	[27]		80	988	[1]
	20,3	1127	[28]		85	948	[1]
Гелий	0,985	237,66	[29]		89,6	911	[25]
	1,08	237,67	[29]	Метан	94,9	1545	[35]
	1,76	231,4	[30]		111,4	1418	[35]

Таблица 7.6. **Скорость звука в жидкостях при 20°С**

Вещество	v, м/с	$\Delta v/\Delta t$, м/(°С·с)	Литература
Акролеин	1190	—4,1	[36]
Алил хлористый (28° С)	1088	—	[37]
Амилацетат (26° С)	1168	—	[37]
Амил бромистый	981	—	[38]
Амилформиат	1223	—4,2	[36]
Анилин	1659	—4,0	[39]
Ацеталь (24° С)	1378	—	[37]
Ацетилацетон	1383	—5,2	[38]
Ацетил хлористый	1060	—	[38]
Ацетон	1189	—4,3	[39]
Ацетонилацетон	1416	—4,8	[38]
Ацетонитрил	1304	—5,0	[38]
Ацетоуксусный эфир(25,5°С)	1417	—	[37]
Ацетофенон	1496	—3,7	[37]
Бензальдегид	1479	—4,0	[38]
Бензилацетон	1514	—	[38]
Бензил хлористый	1420	—4,6	[38]
Бензоил хлористый (28° С)	1318	—	[37]
Бензол	1324	—4,6	[39]
Бензол тяжелый	1238	—4,25	[40]
Бромаль	966	—3,4	[38]
Бромбензол	1170	—3,12	[41]
α-Бромнафталин	1372	—3,1	[39]
Бромоформ	931	—2,2	[41]
н-Бутилацетат	1226	—4,1	[36]
изо-Бутилацетат	1182	—4,0	[36]
Бутил:			
бромистый	990	—4,0	[38]
иодистый	977	—3,6	[38]
хлористый	1133	—4,6	[38]
2,3-Бутиленгликоль(25°С)	1484	—	[42]
Бутилформиат	1215	—4,1	[36]
Вода	1482,7	+3,1	[43]
Вода тяжелая (25° С)	1399	+2,8	[44]
Гексан	1083	—	[38]
Гексил:			
иодистый	1081	—3,2	[38]
хлористый	1221	—4,2	[38]
Гемеллитол	1372	—	[38]
Гептан	1162	—4,5	[38]
Гептанон	1207	—	[38]
1-Гептен	1128	—	[45]
Геранилацетат (28° С)	1328	—	[37]
Гидринден	1403	—	[38]
Глицерин	1895	—1,9	[36]
1-Децен	1250	—	[45]
Децил хлористый	1318	—4,2	[38]
Диамиловый эфир (26° С)	1153	—	[37]
Дибромэтилен	1009	—	[38]
Диацетил (25° С)	1236	—4,5	[42]
цис-Дибромэтилен	957	—2,4	[46]
транс-Дибромэтилен	936	—2,2	[46]
Диметиланнлин	1509	—3,6	[38]
Диоксан	1389	—6,2	[38]
Дипентен (23,8° С)	1328	—	[37]
Дипропиловый эфир	1112	—	[38]
Дифенилметан	1501	—	[37]
Дифениловый эфир (24° С)	1469	—	[37]
мета-Дихлорбензол (28° С)	1232	—	[37]
орто-Дихлорбензол	1295	—	[37]
Дихлорэтан (23° С)	1240	—	[37]
цис-Дихлорэтилен	1090	—3,7	[46]
транс-Дихлорэтилен	1031	—3,7	[46]

Вещество	v, м/с	$\Delta v/\Delta t$, м/(°С·с)	Литература
Диэтиланилин	1482	—4,0	[38]
Диэтиленгликоль (25° С)	1586	—2,4	[42]
Диэтилкарбонат (28° С)	1173	—	[37]
Диэтилкетон (25° С)	1218	—	[36]
Диэтиловый эфир	1008	—5,4	[38]
Диэтилфталат (23° С)	1471	—	[37]
Изопропилбензол	1342	—	[38]
Инден	1475	—	[38]
Иодбензол	1114	—2,7	[41]
α-Ионон	1432	—	[38]
Карвакрол	1475	—5,0	[38]
Кислота:			
валериановая	1244	—4,8	[38]
каприловая	1331	—5,0	[38]
капроновая	1280	—5,0	[47]
малеиновая	1352	—3,8	[38]
масляная	1203	—4,8	[38]
муравьиная	1287	—	[38]
олеиновая (45° С)	1333	—3,3	[46]
пальметиновая (62,1° С)	1328	—	[47]
пировиноградная	1471	—	[38]
пропионовая	1176	—5,0	[38]
серная (15° С)	1440	—	[48]
тиоуксусная	1168	—	[38]
уксусная	1150	—	[38]
фумаровая	1303	—3,5	[49]
элаидиновая (45° С)	1346	—3,5	[49]
энантовая	1312	—5,0	[38]
Коричный альдегид (25° С)	1554	—3,1	[42]
орто-Крезол (25° С)	1506	—3,5	[42]
Кротоновый альдегид	1288	—4,1	[36]
мета-Ксилол	1344	—4,1	[36]
н-Ксилол	1330	—4,8	[38]
орто-Ксилол	1364	—3,8	[36]
Линалоол	1341	—	[38]
Мезитилен	1362	—4,8	[38]
N-Метиланилин	1586	—	[38]
Метилацетат	1182	—4,7	[36]
2-Метилбутанол (30° С)	1225	—	[50]
Метилгексалин (22,5° С)	1528	—	[37]
Метилгексилкетон (24° С)	1324	—	[37]
Метилен:			
бромистый	963	—2,6	[41]
иодистый	973	—1,9	[41]
хлористый	1093	—3,9	[41]
Метилизопропилбензол (28° С)	1308	—	[37]
Метил иодистый	834	—	[38]
Метилпропионат (24,5° С)	1215	—	[37]
Метилсалицилат (28° С)	1408	—	[37]
Метилциклогексан	1247	—5,6	[38]
2-Метилциклогексанол (25,5° С)	1421	—	[37]
4-Метилциклогексанол (25,5° С)	1387	—	[37]
2-Метилциклогексанон	1353	—	[37]
Метилэтилкетон	1207	—5,0	[38]
Монохлорнафталин (27° С)	1462	—	[37]
Морфолин (25°С)	1442	—3,7	[42]
Никотин	1491	—5,0	[38]
Нитробензол	1475	—3,4	[36]
Нитрометан	1346	—4,1	[38]

Вещество	v, м/с	$\Delta v/\Delta t$, м/(°С · с)	Литература
мета-Нитротолуол	1481	—3,6	[36]
орто-Нитротолуол	1473	—3,7	[41]
Нонан	1248	—4,4	[38]
1-Нонен	1218	—	[45]
Оксид мезитила	1310	—	[42]
н-Октан	1192	—4,2	[39]
изо-Октан	1111	—	[36]
1-Октен	1184	—	[45]
Октил:			
бромистый	1182	—4,8	[38]
хлористый	1280	—4,2	[38]
Паральдегид	1192	—4,2	[36]
1-Пентадецен	1351	—	[45]
Пентан	1008	—4,2	[38]
Пентахлорэтан	1113	—	[38]
Перхлорэтилен	1066	—	[38]
α-Пиколин (28° С)	1453	—	[37]
β-Пиколин (28° С)	1419	—	[37]
Пинен (24° С)	1247	—	[37]
Пиперидин	1400	—	[38]
Пиридин	1441	—4,1	[41]
н-Пропилацетат	1198	—4,8	[36]
изо-Пропилацетат	1133	—4,4	[36]
Пропил:			
иодистый	929	—4,0	[38]
хлористый	1091	—4,4	[38]
Пропионитрил	1271	—	[38]
Псевдобутил-метаксилол	1354	—	[38]
Псевдокумол	1368	—	[38]
Салициловый альдегид (27° С)	1474	—	[39]
Сероуглерод	1158	—3,2	[37]
Спирт:			
н-амиловый	1294	—	[38]
изо-амиловый	1260	—3,4	[36]
трет-амиловый	1204	—	[37]
бензиловый	1540	—3,2	[38]
н-бутиловый	1263	—3,6	[36]
изо-бутиловый	1212	—3,5	[36]
н-гексиловый	1322	—3,5	[36]
н-гептиловый	1341	—3,7	[36]
н-декановый	1402	—3,7	[36]
децилловый	1413	—4,4	[47]
тетрадецилловый (38,4° С)	1404	—	[47]
додецилловый (22,3° С)	1433	—	[47]
метиловый	1123	—3,3	[38]
н-ниловый	1391	—4,3	[38]
н-октиловый	1358	—3,6	[36]
н-пропиловый	1223	—3,7	[36]
изо-пропиловый	1170	—4,0	[38]
н-пентиловый	1294	—3,5	[36]
γ-фенилпропиловый (30° С)	1523	—	[50]
β-фенилэтиловый (30° С)	1512	—	[50]
фуриловый (25° С)	1450	—3,5	[42]
этиловый	1165	—3,4	[36]
Стирол	1354	—	[36]
Тетрабромэтан	1041	—	[39]
Тетралин	1492	—4,5	[38]
Тетранитрометан	1039	—4,0	[38]
Тетрахлорэтан	1171	—	[38]
Тетрахлорэтилен	1053	—2,9	[36]
Тетраэтиленгликоль (25° С)	1586	—3,0	[42]
Тиофен	1300	—4,2	[38]
мета-Толуидин	1594	—3,5	[36]
орто-Толуидин	1618	—3,9	[36]
Толуол	1328	—4,3	[39]
1-Тридецен	1313	—	[45]
Триметиленбромид (23,5° С)	1144	—	[37]
Триолеин	1482	—	[38]
1,2,4-Трихлорбензол	1301	—	[38]
Трихлорэтилен	1049	—4,4	[38]
Триэтиленгликоль (25° С)	1608	—3,8	[42]
Уксусный ангидрид (24° С)	1384	—	[37]
1-Уиндецен	1275	—	[45]
Фенилгидразин	1738	—	[38]
Фенол (100° С)	1274	—3,2	[51]
Формамид	1550	—	[38]
Хинальдин	1575	—	[38]
Хинолин	1600	—4,8	[38]
Хлорбензол	1289	—3,7	[39]
α-Хлорнафталин	1481	—	[38]
Хлороформ	1005	—3,6	[38]
мета-Хлортолуол	1326	—	[38]
орто-Хлортолуол	1344	—	[38]
н-Хлортолуол	1316	—	[38]
Циклогексан	1277	—4,6	[36]
Циклогексанол	1493	—4,9	[38]
Циклогексанон	1449	—5,4	[38]
Циклогексен	1305	—5,4	[38]
Циклогексиламин	1435	—	[38]
Циклогексил хлористый	1319	—4,8	[38]
Циклопентадиен	1421	—	[38]
Циклопентан (30° С)	1182	—	[36]
Циклопентанон (24° С)	1474	—	[37]
Цитраль	1442	—3,8	[38]
Четыреххлористый углерод	938	—3,0	[38]
Этилацетат	1177	—4,5	[36]
Этилбензиланилин	1586	—	[38]
Этилбензол	1338	—4,4	[38]
Этил:			
бромистый	900	—3,4	[41]
иодистый	876	—2,7	[41]
Этилбутират	1197	—4,1	[36]
Этилен:			
бромистый	1009	—2,6	[41]
хлористый	1216	—3,9	[41]
Этиленгликоль	1667	—2,5	[36]
Этилкаприлат (28°С)	1263	—	[37]
Этиловый эфир:			
диэтиленгликоля (25°С)	1458	—	[42]
орто-крезола (25° С)	1315	—	[37]
фенола (26° С)	1153	—	[37]
хлоруксусной кислоты (25,5 °С)	1234	—	[37]
Этилпропионат (23,5° С)	1185	—	[37]
Этилфенолкетон	1498	—	[38]
Этилформиат (24° С)	1121	—	[37]

Таблица 7.7. **Скорость звука в маслах, нефти и нефтепродуктах [52]**

Вещество	t, °С	v, м/с	Вещество	t, °С	v, м/с	$\Delta v/\Delta t$, м/(°С · с)
Масло:			Авиамасло:			
анисовое	28,5	1451	МС-20	20	1506	—3,9 [53]
арахисовое	31,5	1562	компрессорное	20	1503	—4,0 [53]
вербеновое	29	1323	КС-19			
веретенное	32	1342	трансформаторное	20	1445	—3,8 [53]
газолиновое	34	1250		25	1415	— [48]
гераниевое	27	1192	Бензин А-66	20	1081	—4.0 [53]
горчичное	31,5	1825	Бензин А-72	19,6	1158	— [53]
иононовое	34	1331	Гудрон масляный	20	1512	—3,7 [53]
кассиевое	28,5	1460	Дизельное топливо «Летнее»	20	1357	—4,15 [53]
касторовое	21	1500 [33]	Дизельное топливо «Зимнее»	20	1332	—3,9 [53]
кедровое	29	1406	Керосин	34	1295	—
кокосовое	31,5	1490	Нефть отечественных месторождений	—	1335÷1379	—3,88 ÷ —4,09 [53]
ксанторидзиевое	29	1394				
кунжутное	32,5	1432				
лавандовое	28,5	1310				
лимонное	29	1076				
линалооловое	32	1397				
льняное	31,5	1772				
оливковое	32,5	1381				
парафиновое	33,5	1420				
сосновое	31	1468				
спермацетовое	33	1210				
сурепное	30,8	1450				
терпентинное	27	1280				
эвкалиптовое	29,5	1276				

Таблица 7.8. **Скорость звука в дистиллированной воде в зависимости от температуры при $p_0 = 980$ ГПа [43]***

t, °С	v, м/с	t, °С	v, м/с	t, °С	v, м/с	t, °С	v, м/с
	1400+		1400+		1500+		1500+
0	2,7	26	99,6	51	43,9	76	55,4
1	7,7		1500+	52	44,9	77	55,3
2	12,6	27	2,2	53	45,9	78	55,2
3	17,3	28	4,7	54	46,8	79	55,0
4	22,0	29	7,1	55	47,7	80	54,8
5	26,5	30	9,4	56	48,5	81	54,6
6	30,9	31	11,7	57	49,3	82	54,3
7	35,2	32	13,9	58	50,0	83	54,0
8	39,5	33	16,1	59	50,7	84	53,6
9	43,6	34	18,1	60	51,3	85	53,2
10	47,6	35	20,1	61	51,9	86	52,8
11	51,5	36	22,1	62	52,4	87	52,4
12	55,3	37	23,9	63	52,9	88	51,9
13	59,1	38	25,7	64	53,4	89	51,3
14	62,7	39	27,5	65	53,8	90	50,8
15	66,3	40	29,2	66	54,1	91	50,2
16	69,7	41	30,8	67	54,4	92	49,6
17	73,1	42	32,4	68	54,7	93	48,9
18	76,4	43	33,9	69	54,9	94	48,2
19	79,6	44	35,3	70	55,1	95	47,5
20	82,7	45	36,7	71	55,3	96	46,8
21	85,7	46	38,1	72	55,4	97	46,0
22	88,6	47	39,3	73	55,4	98	45,1
23	91,5	48	40,6	74	55,5	99	44,3
24	94,3	49	41,7	75	55,5	100	43,4
25	97,0	50	42,9				

* Измерения проведены на частотах $f = 0{,}75$ и 3,5 МГц. См. также [54].

Таблица 7.9. **Скорость звука в расплавах**

Вещество	t, °C	v, м/с	Δt	$-\Delta v/\Delta t$, м/(К · с)	Литература
Алюминий	660	4673—4730	—	0,16—0,47	[55, 56]
Бромистый калий	742	1770	745—1010	0,67	[57]
Бромистый натрий	745	1798	750—1010	0,63	[57]
Висмут	280	1649—1663	289—356	0—0,08	[58, 59]
Галлий	30	2740—2872	30—275	0,23	[60, 61]
Индий	156	2215—2315	156—950	0,27—0,5	[60, 61]
Иодистый калий	682	1555	690—1020	0,64	[57]
Иодистый натрий	660	1502	670—1030	0,54	[57]
Кадмий	321	2200—2256	321—750	0,29—0,62	[60—62]
Калий	64	1820—1880	64—160	0,5—0,53	[60, 63, 64]
Медь	1100	3460	1083—1500	0,46	[61]
Натрий	100	2395—2653	98—700	0,3—0,66	[60, 63, 64, 66]
Олово	232	2270—2480	232—1000	0,21—0,7	[60, 61, 67—69]
Ртуть	20	1450—1452	0—204	0,31—0,7	[68, 70—72]
Рубидий	39	1260	39—160	0,4	[60]
Свинец	327	1790—1820	327—1000	0,3—0,53	[58, 60—62]
Сера	115	1315	—	—	[60]
Серебро	970	2710—2770	961—1540	0,41—0,47	[61, 73]
Сурьма	630	1980	630—880	0	[73]
Таллий	302	1625	—	—	[60]
Теллур	460	920	460—950	Изменяет знак	[61]
Хлористый калий	770	2275	785—1020	0,88	[57]
Хлористый натрий	800	2483	810—1010	0,92	[57]
Цезий	29	967	29—130	0,3	[60]
Цинк	420	2700—2850	419—850	0,27—0,31	[60, 61, 73, 74]

Таблица 7.10. **Скорость звука и ее анизотропия в жидких кристаллах**

Вещество	t, °C	v, 10^3 м/с	Литература	Вещество	t, °C	v, 10^3 м/с		Литература
						$\theta = 0°$	$\theta = 90°$	
Холестериллнно-леат	30	1,54	[82]	Диэтил-*p*-*p*-азоксидибензоат	117,4	1,275	1,23	[84]
	50	1,44			113,2	1,30	1,255	
Холестерилпропионат	100	1,268	[83]	Этил-*p*-метоксибензилиден аминоциннамат	88,2	1,65	1,56	[85]
	124	1,204				1,475 ($\theta = 45°$)		
Холестерилаурат	73	1,384	[83]					
	98,5	1,268						

Примечание. θ — угол между направлением распространения звука и осью спирали геликоида.

Таблица 7.11. **Скорость фронта ударной волны в жидкостях [86]**

Вещество	t, °C	Отношение плотности до фронта к плотности за фронтом волны	Скачок давления, 10^2 МПа	Скорость фронта, м/с	Вещество	t, °C	Отношение плотности до фронта к плотности за фронтом волны	Скачок давления, 10^2 МПа	Скорость фронта, м/с
Вода	20	0,716	31,4	3354	Метиловый спирт	15	0,625	46,0	3950
		0,658	57,4	4126	Четыреххлористый углерод	22	0,622	72,9	3510
		0,620	86,6	4813	Глицерин	18	0,710	75,6	4580
		0,622	84,3	4757	Ацетон	30	0,623	45,7	3970
		0,577	131	5604	Бензол	16	0,647	51,6	4100
		0,488	329	8070	Толуол	15	0,650	51,5	4120
		0,456	383	8450					
		0,444	395	8490					
		0,450	414	8740					

Таблица 7.12. **Параметр n адиабатической квадратичной нелинейности жидкостей ($t \sim 20°C$)**

Вещество	n	Литература	Вещество	n	Литература
Азот (—195° С)	4,1—8,8	[87,89]	Нонан	11,35	[96]
Аргон (—187° С)	6,01	[89]	Октан	11,34	[96]
Ацетон	9,6—10	[90,91]	Олово (240° С)	5,4	[88]
Амилацетат	6,1	[87]	Ртуть (30°С)	8,8	[88]
Бензин А-70	11,2	[90,91]	Спирт:		
Бензол	9,4—10,5	[91,92]	*н*-бутиловый	9,6	[90]
Висмут (318° С)	8,1	[88]	*н*-гексиловый	10,7	[90]
Вода	6,06—7,6	[90, 91, 93, 94]	*н*-дециловый	9,6	[90]
Вода тяжелая	5,52	[95]	метиловый	8,6—9,7	[87,90,91]
Водород (—259° С)	6,59	[89]	*н*-ниниловый	10,0	[90]
Пароводород (—258° С)	8,12	[95]	*н*-октиловый	9,7	[90]
Гептан	11,16	[96]	*н*-пропиловый	9,9	[90]
Глицерин	10,4	[95]	этиловый	10,6—11,0	[90,91]
Додекан	11,41	[96]	Толуол	10,4—11,2	[90,96]
Дихлорэтан	8,6—8,7	[90, 91]	Трансформаторное масло	7,5	[90]
Индий (160° С)	5,5	[88]	Четыреххлористый углерод	11,4—11,8	[90,91]
мета-Ксилол	9,7—10,6	[90, 93]	Хлороформ	11,5—11,6	[90,91]
Метан (—163°С)	18,95	[89]	Этилацетат	6,0	[87]
Натрий (110° С)	3,7	[88]	Эфир этиловый	4,1	[87]

Таблица 7.13. **Зависимость нелинейного параметра n воды от температуры и давления** [97]

t, °С	Давление, МПа					
	0,1	25	50	100	400	800
0	5,08	5,90	6,58	7,35	7,60	—
30	6,21; 7,0 [90]	6,43	6,63	6,83	7,19	—
50	6,55; 7,3 [90]	6,62	6,69	6,80	6,97	6,68
80	6,74; 7,7 [90]	6,79	6,84	6,86	6,64	6,50
95	8,1 [90]	—	—	—	—	—

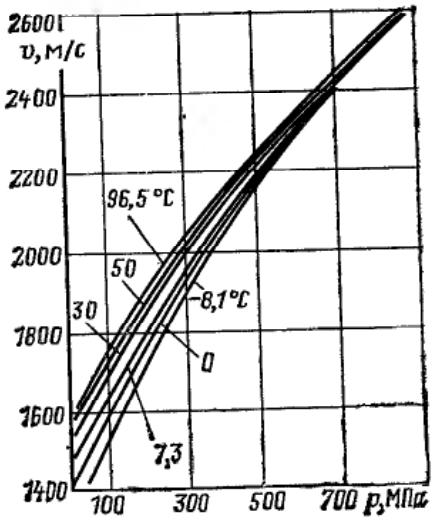


Рис. 7.13. Зависимость скорости звука в воде от давления при различной температуре [80]

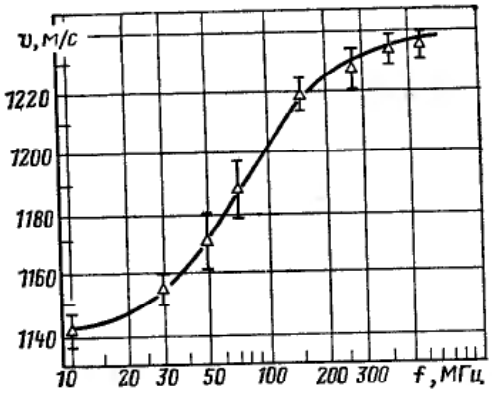


Рис. 7.14. Дисперсия скорости звука в сероуглероде при 25°С (колебательная релаксация C-S-связей) [81]

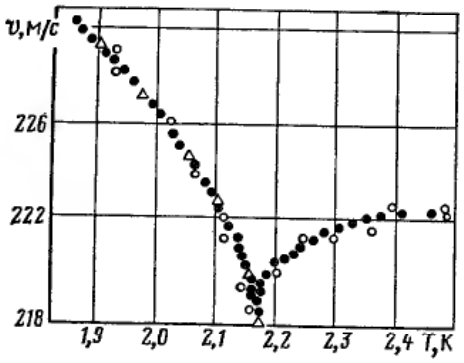


Рис. 7.15. Скорость звука в жидком гелии вблизи λ-точки (точки перехода He I в сверхтекучее состояние He II) [65]

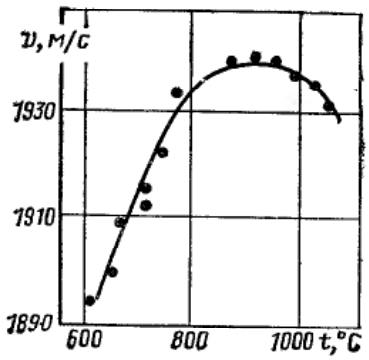


Рис. 7.16. Зависимость скорости звука от температуры в жидком висмуте [61]

Таблица 7.14. **Коэффициент поглощения звука в жидкостях**

Вещество	t, °C	f, МГц	α/f^2, 10^{-15} с²/м	Литература
Азот	—199,3	44,4	10,5	[100]
н-Амилацетат	20	20—200	65	[36]
орто-Анизидин	24,8	104,3	58,8	[101]
Анизол	24,8	104	43,8	[101]
Анисальдегид	24,6	104,1	63,6	[101]
Анилин	25	0,3—0,6	50	[36]
Аргон	—188	44,4	10,1	[100]
Ацеталь	25	100—200	57—43	[36]
Ацетил хлористый	24,6	104	82,8	[36]
Ацетон	25	20—1900	31—28	[36, 105]
	25	1—4	70	[42]
Ацетонитрил	25	7—10	80	[36]
Ацетофенон	25	15—20	50	[36]
Бензилацетон	25	10—200	58	[36]
Бензилметилкетон	25	10—200	53	[36]
Бензилхлорид	25	20—200	74	[36]
Бензол:	25	0,5—30	880—870	[102]
	20	482	445	[104]
	20	1200—1900	184—95	[105]
бромистый	25	20—100	145	[36]
	25	1000—1900	128—94	[105]
иодистый	25	20—260	210	[104]
Бензотрихлорид	25	100—200	107	[36]
н-Броманизол	25	100—200	62	[36]
орто-Броманизол	25	100—200	70	[36]
Бромоформ	25	0,2—200	250	[36]
Бутил:				
бромистый	2	15	49	[102]
иодистый	2	15	48	[102]
хлористый	2	15	108	[102]
н-Бутилацетат	20	40—200	46	[36]
изо-Бутилацетат	25	20—200	55	[36]
Вода	20	7—1900	25	[36, 104, 105]
	20	843	24,2	[104]
Водород	—256,2	44,4	5,6	[36]
н-Гексан	25	20—200	60	[36]
н-Гептан	25	1—15	80	[36]
Гелий	—270,2	15	110	[31]
Глицерин	—18,8	30	12 200	[106]
	20—27	0,15—4	2500	[42]
Декагидронафталин	25	100—200	121	[36]
1,2-Диброметан	25	30	311	[107]
1,1-Диметилциклогексан	24,1	104,1	127	[101]
1,4-Диоксан	25	100—200	114	[36]

Вещество	t, °С	f, МГц	α/f^2, 10^{-15} с^2/м	Литература
орто-Дихлорбензол	24	100—200	131	[36]
1,1-Дихлорэтан	25	30	100	[36]
1,2-Дихлорэтан	30	0,7—1,2	105	[102]
транс-Дихлорэтилен	25	30	360	[36]
Диэтиламин	25	100—200	35	[36]
Диэтилкетон	25	10—200	25	[36]
Изопрен	15	10—190	58	[36]
Инден	25	100—200	133	[36]
Кислород	—213,2	44,4	8,6	[36]
Кислота:				
дихлоруксусная	25	100—200	214—201	[36]
изовалериановая	25	100—200	170	[36]
муравьиная	17,5	4	2270	[108]
	20,5	9,8	1170	[108]
	18	0,5	30 000	[109]
уксусная	18	67,5	158	[36]
	25	100—200	140	[36]
	25	100—200	91	[36]
фурфуриловая	24,8	104,2	96	[101]
Коричный альдегид	24,6	104,2	82,7	[101]
Кротоновый альдегид	25	20—200	65	[36]
орто-Ксилол	25	1—20	60	[36]
пара-Ксилол				
Масло:				
касторовое	18,6	3,16	10 900	[106]
	20	1,43	6000	[110]
	20,5	3,1	1470	[110]
льняное	21—25	1—4	1250	[111]
оливковое	24,4	104,1	35,7	[101]
Мезитилоксид	24,4	104.1	39,2	[101]
Метилаль	25	1	468	[111]
Метилацетат	24,4	104,2	36	[101]
	20	27—482	80	[104]
Метилбензол	24,5	104,1	35,3	[101]
Метилбутират	24,9	104	58,7	[101]
Метилдисульфид				
Метил:				
бромистый	2	15	300	[36]
иодистый	25	15—200	310	[36]
Метилен:				
бромистый	2	15	304	[36]
	25	30	560	[36]
	25	1000—1900	104—40	[105]
	25	1—4	816—820	[36]
иодистый	25	30	250	[36]
	20	21,6	920	[104]
хлористый	20	482	171	[104]
	24,5	104	57,5	[101]
Метилсалицилат	24,6	104,1	32	[101]
Метилформамид	25	5—25	50	[36]
Метилформиат	25	100—200	95	[36]
Метилциклогексан	25	10—200	30	[36]
Метилэтилкетон	25	100—200	70	[36]
орто-Нитроанизол	25	0,3—200	73	[36]
Нитробензол	25	7—10	90	[36]
Нитрометан	20	40—200	40	[36]
н-Пропилацетат	25	20—200	65	[36]
изо-Пропилацетат	25	2—200	64	[36]
изо-Пропилбензол				
Пропил:				
бромистый	2	15	39	[103]
иодистый	2	15	54	[103]
хлористый	2	15	42	[103]
β-Пиколин	24,5	100—200	65	[36]
Пиридин	0	0,25—1,0	334	[114]
Сероуглерод	20	1—10	6000	[108]
	25,5	189,2	776	[101]
	25	1000—1900	37—17	[105]

Вещество	t, °С	f, МГц	α/f^2, 10^{-15} с^2/м	Литература
Спирт:				
алиловый	25	100—200	45	[36]
н-амиловый	25	21	102	[36]
изоамиловый	25	100—200	131	[36]
бензиловый	25	50—200	79	[36]
н-бутиловый	25	4—200	81	[36]
изобутиловый	25	100—200	140	[36]
метиловый	25	7—250	33	[36]
н-пропиловый	25	15—280	75	[36]
изопропиловый	23	15	92	[36]
этиловый	25	8—220	53	[36]
фурфуриловый	25	100—200	91	[36]
Толуол	27	0,15	205	[113]
	25	100—200	86	[36]
	20	1000—1900	81—66	[105]
Тиофен	20	301	775	[104]
	20	482	469	[104]
	20	843—1900	160—46	[104, 105]
Толуидин	25	27—482	50—60	[107]
Трибромэтан	25	10—110	200	[36]
Трихлорэтан	30	1,0	245	[102]
	25	10—110	130	[36]
Трихлорэтилен	25	0,2—0,6	200	[36]
Тетрахлорэтилен	25	0,2—0,4	304	[36]
Уксусный ангидрид	30	0,7—1,2	445	[102]
	24,6	104	58	[101]
Формамид	25	10—100	40	[36]
Фторбензол	25	30	278	[36]
	25	1000—1900	221—140	[105]
орто-Хлоранилин	25	100—200	54	[36]
Хлорбензол	25	1—200	140	[36]
	25	1000—1900	125—96	[105]
Хлороформ	25	0,2—200	418—380	[36]
	20	1000—1900	220—106	[105]
орто-Хлорфенол	25	100—200	95	[36]
2-Хлорэтанол	24,4	104,1	59	[101]
Циклогексан	30	0,6—1,2	250	[102]
	25	100—200	101	[36]
Циклогексанон	25	100—200	71	[36]
Циклогексен	25	100—200	102	[36]
Циклогексиламин	25	100—200	64	[36]
Четыреххлористый углерод	30	0,5—1,2	560	[102]
	25	3—200	540—517	[36, 104]
	20	482	480	[104]
	20	1000—1900	405—226	[105]
Эпихлоргидрин	24,4	104,1	68	[101]
Этаноламин	24,8	100—200	152	[36]
Этил:				
бромистый	25	1—200	70—62	[36]
иодистый	2	15	40	[36]
Этилацетат	30	0,8—1,2	258	[102]
	25	1,0	500	[36]
	20	40—200	35	[36]
Этилбензол	25	100—200	55	[36]
Этилбутират	24,4	104	39	[101]
Этилформиат	25	20—100	50	[36]
Этилен:				
бромистый	25	0,2—200	300	[36]
хлористый	25	1—30	140	[36]
Этиленгликоль	25	5—15	120	[36]
Эфир:				
изопропиловый	24	104	53	[36]
этиловый	25	10—100	45	[36]

Таблица 7.15. **Коэффициент поглощения звука в расплавах металлов**

Вещество	t, °C	α/f^2, 10^{-15} с²/м	Литература	Вещество	t, °C	α/f^2, 10^{-15} с²/м	Литература
Висмут	280	8,05	[74]	Натрий	100	11,5	[72]
	305	9,3	[72]	Олово	240	5,63	[74]
Галлий	30	1,58	[75]	Ртуть	25	5,7—6,2	[72,75]
Кадмий	360	14,5	[74]	Свинец	340	9,4	[74]
Калий	75	29,9	[72]	Цинк	450	3,7	[74]

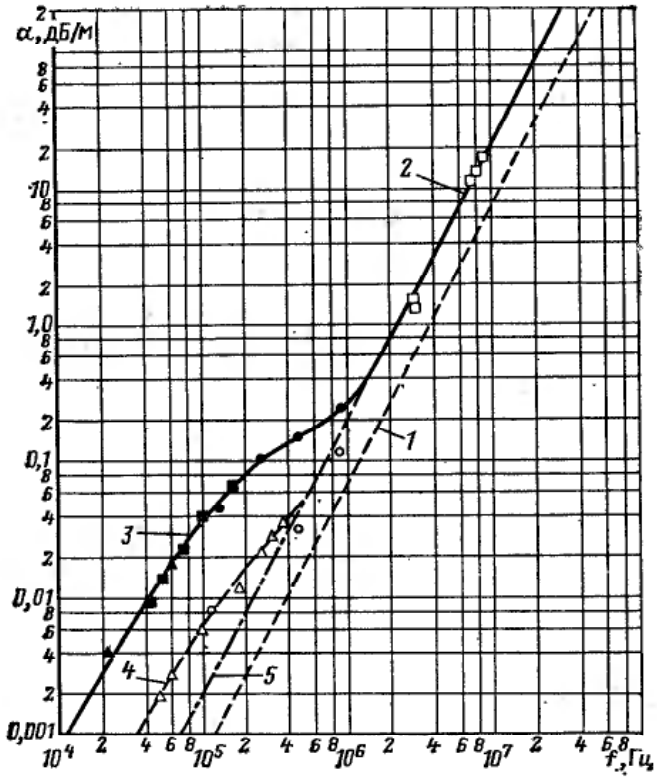


Рис. 7.17. Затухание звука в пресной и морской воде на высоких звуковых и ультразвуковых частотах:

1 — теория; *2* — эксперимент для морской и пресной воды; *3* — эксперимент для морской воды; *4* — эксперимент для пресной воды; *5* — экстраполяция данных для пресной воды [98]

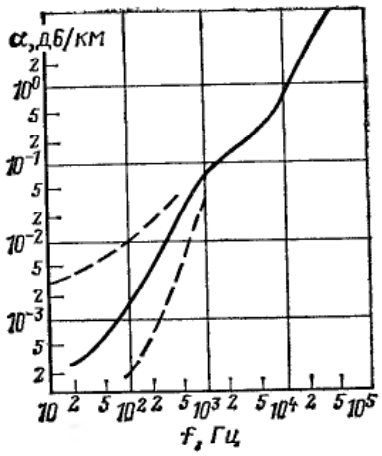


Рис. 7.18. Затухание звука в морской воде на низких частотах: сплошная линия — усредненные результаты измерений на длинных океанических трассах [99]; пунктир — область разброса экспериментальных данных

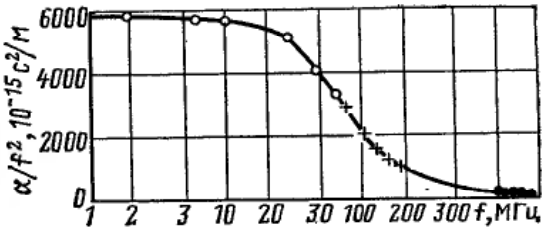


Рис. 7.19. Зависимость α/f^2 от частоты в сероуглероде при $t=25$°C (колебательная релаксация C-S-связей) [115]:

○ — данные [105]

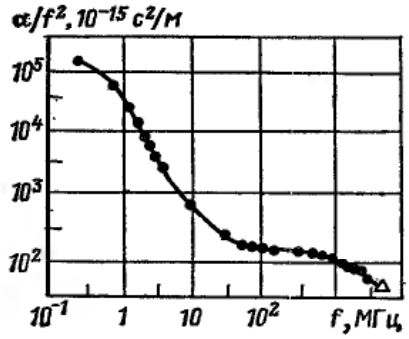


Рис. 7.20. Частотная зависимость α/f^2 в уксусной кислоте при $t=20\div25$ °C [116]:

△ — данные [117], полученные по тонкой структуре рассеяния света

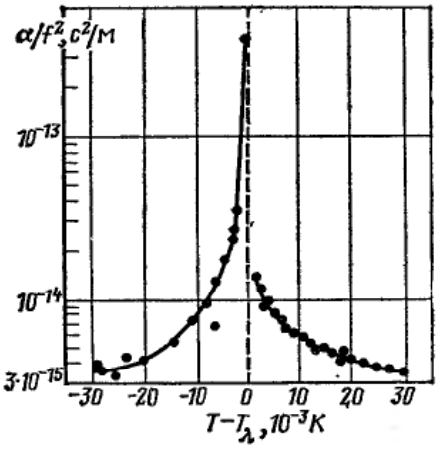


Рис. 7.21. Зависимость α/f^2 вблизи λ-точки в гелии ($f=1\div12{,}1$ МГц) [119]

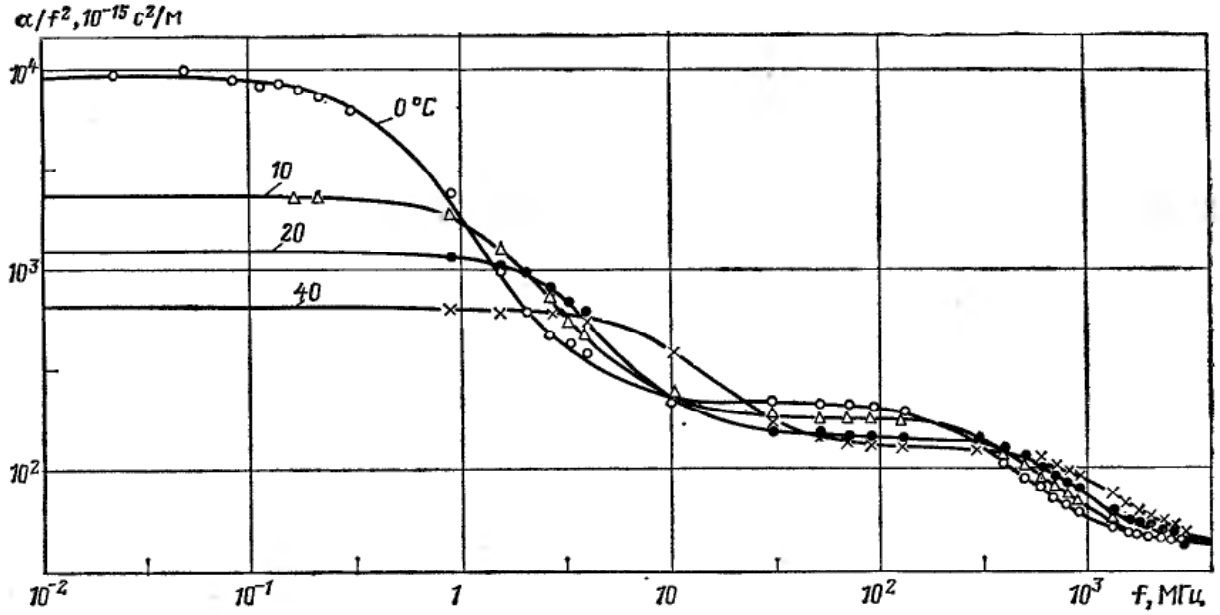


Рис. 7.22. Зависимость α/f^2 от частоты (две области релаксации) в капроновой кислоте при разной температуре [118]

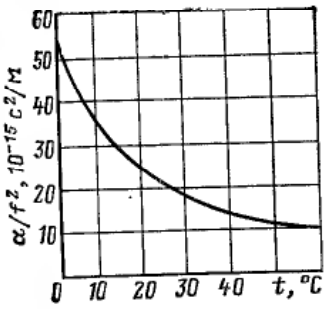


Рис. 7.23. Зависимость α/f^2 в воде от температуры ($f=0{,}1\div100$ МГц) [54, 120]

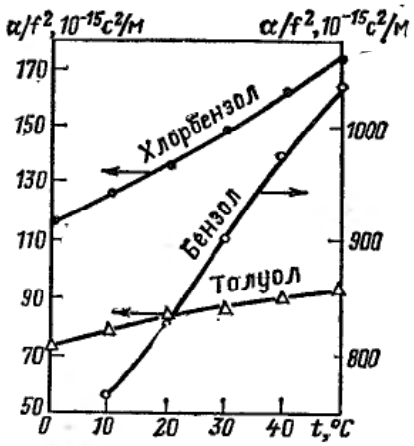


Рис. 7. 24. Зависимость α/f^2 от температуры для хлорбензола ($f=15\div30$ МГц), толуола ($f=12\div16$ МГц) и бензола ($f=6\div12$ МГц) [121]

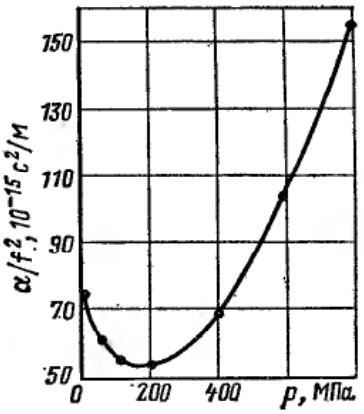


Рис. 7.25. Зависимость α/f^2 для *н*-бутилового спирта от давления [79]

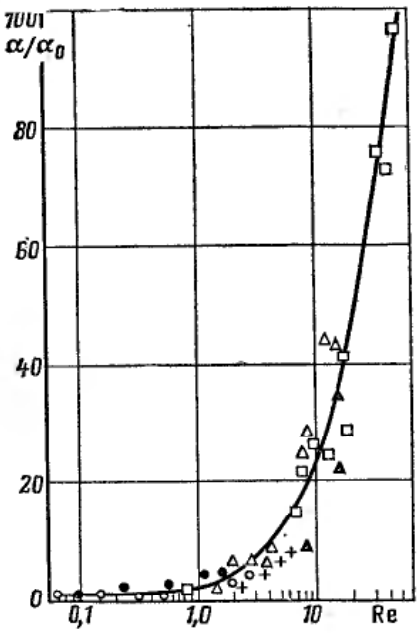


Рис. 7.26. Нелинейное затухание в воде — зависимость коэффициента поглощения от амплитуды волны p' ($\mathrm{Re}=p'/2\pi bf$, $b=\rho_0 v^3\alpha/\pi^2 f^2$):

● — [122]; ○ — [123]; ▲ — [124]; △ — [125]; + — [126]; □ — [127]

7.4. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ (табл. 7.16—7.26, рис. 7.27—7.51)

Таблица 7.16. Скорость звука и удельное волновое сопротивление поликристаллических и аморфных твердых тел ($t = 20°$ С)

Вещество	Скорость звука, 10^3 м/с			Волновое сопротивление, 10^5 кг/(м² · с)		Литература
	в стержне $v_{ст}$	продольная v_l	поперечная v_s	z_l	z_s	
Алюминий	5,08	6,26	3,08	169	83,2	[4]
(372° С)	4,34	—	—	—	—	[129]
Бериллий (27° С)	—	12,55	8,83	232	162	[130]
Висмут	1,79	2,18	1,10	214	108	[4]
Вольфрам	4,31	5,46	2,62	1042	500	[4]
Железо	5,17	5,85	3,23	456	252	[4]
Золото	2,03	3,24	1,20	626	232	[4]
Индий	—	2,56	0,81	187	59	[131]
Иридий	4,79	—	—	—	—	[4]
Кадмий	2,40	2,78	1,50	240	129	[4]
Константан	4,30	5,24	2,64	460	232	[4]
Латунь	3,49	4,43	2,12	361	172	[4]
Магний	4,90	5,78	—	101	—	[132]
Манганин	3,83	4,66	2,35	393	197	[4]
Марганец	3,83	4,66	—	346	—	[132]
Медь	3,71	4,70	2,26	418	201	[4]
Молибден	—	5,67	3,51	511	316	[133]
Нейзильбер	3,58	4,76	2,16	400	181	[4]
Никель	4,79	5,63	2,96	495	260	[4]
Олово	2,73	3,32	1,67	242	122	[4]
Оргстекло	—	2,67	1,12	30	13	[4]
Платина	2,80	3,96	1,67	846	357	[4]
Свинец	1,20	2,16	0,70	246	80	[4]
Серебро	2,64	3,60	1,59	380	167	[4]
Сталь (различные марки)	5,0—5,2	5,68—6,10	—	445—477	—	[53, 134]
Сурьма	3,40	—	—	—	—	[132]
Тантал	3,35	—	—	—	—	[132]
Титан	5,04	6,33	3,11	285	139	[133]
Хром	—	4,2	—	300	—	[135]
Цинк	3,81	4,17	2,41	296	171	[4]
Чугун	3,85	4,50	2,40	350	187	[136]
Стекло:						
плавленый кварц	—	5,935	3,740	132	83	[137]
боратное (17° С)	—	3,47	1,25	62	23	[48]
германатное (17° С)	—	3,61	2,21	130	80	[48]
халькогенидное (As_2S_3)	—	2,58	1,49	85	50	[48]
(As_2Se_3) (17° С)	—	2,23	1,29	103	100	[48]
стеклообразный селен	—	1,84	0,96	79	41	[48]
фтористый бериллий (17° С)	—	4,70	3,90	221	183	[48]
кронглас	5,30	5,66	3,42	141	86	[4]
тяжелый кронглас	4,71	5,26	2,96	—	—	[4]
флинтглас	—	4,26	2,56	154	92	[4]
легкий флинтглас	4,55	4,80	2,95	—	—	[4]
тяжелый флинтглас	3,49	3,76	2,22	173	102	[4]
Винипласт	—	2,30	—	—	—	[53]
Найлон	—	2,65	—	—	—	[138]
Полистирол	—	2,35	1,12	—	—	[4]
Полиэтилен	—	2,48	—	—	—	[138]
Фторопласт	—	1,34	—	—	—	[138]
Эпоксидная смола ЭД-5	—	2,58	1,22	29	13	[53]
Каучук	—	1,48	—	13	—	[4]
Эбонит	1,57	2,40	—	28	—	[4]
Пробка	0,50	—	—	—	—	[4]
Фарфор	4,88	5,34	3,12	128	75	[4]
Парафин	1,46	—	—	—	—	[136]
Лед (0° С)	3,28	3,98	1,99	37	19	[4]

Вещество	Скорость звука, 10^3 м/с			Волновое сопротивление 10^5 кг/(м² · с)		Литература
	в стержне $v_{ст}$	продольная v_l	поперечная v_s	z_l	z_s	
Гипс	—	4,79	2,37	111	55	[48]
Гранит	3,95	4,45—5,57	2,78	165—206	103	[53, 132]
Мрамор	3,81	4,95—6,15	3,26	137—166	88	[132, 139]
Сланец	4,51	—	—	—	—	[132]
Дерево (дуб)	4,05	—	—	—	—	[136]
Базальт	—	5,40—6,15	3,14—3,26	145—166	85—88	[139]
Известняк	—	4,64—6,13	2,39—3,2	125—165	64—86	[139]
Антрацит*	—	$v_{\parallel} = 2{,}52$; $v_{\perp} = 2{,}15$	—	$z_{\parallel} = 40$; $z_{\perp} = 34$	—	[140]
Уголь газовый (Донбасс)*	—	$v_{\parallel} = 1{,}78 \div 2{,}0$; $v_{\perp} = 1{,}23$	—	$z_{\parallel} = 23 \div 26$; $z_{\perp} = 16$	—	[140]
Уголь коксовый (Донбасс)*	—	$v_{\parallel} = 1{,}54$; $v_{\perp} = 1{,}50$	—	$z_{\parallel} \simeq z_{\perp} = 23$	—	[140]

* $v_{\parallel}$ — скорость параллельно слоистости; $v_{\perp}$ — перпендикулярно слоистости.

Таблица 7.17. **Скорость звука в кубических кристаллах ($t = 20 \div 25°$ С)**

Кристалл	Плотность, 10^3, кг/м³	v, 10^3 м/с						Литература
		L_{100}	S_{100}	L_{110}	$S_{110}^{1\bar{1}0}$	L_{111}	S_{111}	
Алмаз	3,51	17,5	12,8	18,3	11,6	18,6	12,0	[48,141]
Алюминий	2,70	6,284	3,26	6,47	2,86	6,473	3,00	[48,141, 146]
Антимонид:								
галлия	5,62	3,96	2,77	4,38	2,07	4,51	2,33	[48,141]
индия	5,79	3,42	2,26	3,77	1,63	3,89	1,87	[142,160]
Арсенид:								
галлия	5,31	4,71	3,34	5,24	2,47	5,40	2,79	[48,160]
индия	5,66	3,84	2,64	4,29	1,83	4,42	2,14	[141,160]
Бромат натрия	3,34	4,08	2,13	3,93	2,41	3,87	2,32	[48]
Бромистый:								
аммоний	2,44	3,72	1,68	3,41	2,25	3,30	2,08	[48]
калий	2,75	3,55	1,36	3,02	2,29	2,84	2,19	[141]
натрий	3,20	3,48	1,74	3,26	2,13	3,18	2,01	[141]
серебро	6,48	2,95	1,05	2,83	1,34	2,79	1,25	[141]
таллий	7,45	2,40	1,14	2,12	1,28	2,07	1,16	[149]
цезий	4,46	2,636	1,30	2,47	1,299	2,41	1,50	[48, 141,148]
Ванадий	6,02	6,15	2,66	5,99	3,011	5,93	2,90	[48, 141]
Ванадосульфат таллия	6,22	2,81	0,873	2,46	1,6	—	—	[169]
Вольфрам	19,2	5,11	2,81	5,11	2,81	5,11	2,81	[141]
Галенит	7,5	4,11	1,82	3,71	2,55	3,56	2,33	[48]
		3,69		3,56	2,07	3,52	1,99	[141]
Германат висмута	9,23	3,65	1,68	3,39	1,67	3,36	—	[156—159]
					2,38			
Германий	5,33	4,92	3.55	5,41	2,75	5,56	3,04	[141]
Гранат:								
алюмоиттриевый	12,0	8,5630	5,0293	8,6016	4,9496	8,60	—	[135,161,162]
			5,0311	8,6167				
железоиттриевый	5,18	7,0800	4,0601	7,172	3,902	—	—	[162—164]
			3,843					
галлиево-иттриевый	5,79	7,08	4,06	—	—	—	—	[135]
α-Железо	7,86	5,55	3,77	6,24	2,46	6,46	2,97	[48]
Золото	19,3	3,10	1,47	3,33	0,866	3,39	1,10	[141]
Иодистый:								
калий	3,13	2,92	1,16	2,51	1,89	2,33	1,68	[141]
натрий	3,67	2,667	1,304	2,374	—	—	—	
		2,83	1,42	2,66	1,73	2,60	1,62	[48, 166]
цезий	4,51	2,326	1,17	2,21	1,39	2,16	1,32	[48]

Кристалл	Плотность, 10^3, кг/м^3	v, 10^3 м/с						Литература
		L_{100}	S_{100}	L_{110}	$S_{110}^{\overline{110}}$	L_{111}	S_{111}	
Калий (—190° С)	0,91	2,24	1,70	2,73	0,68	2,88	1,13	[141]
Кремний:	2,33	8,43	5,84	9,13	4,67	9,35	5,09	[143]
KRS-5	7,37	$v_L = 2{,}078$*; $v_S = 0{,}874$*						[167]
KRS-6	7,19	2,416	—	2,2170	1,0278	—	—	[167]
Литий (—195° С)	0,55	5,19	4,43	6,67	1,41	7,09	2,82	[141]
Литий — индий	5,16	3,29	2,27	3,82	1,17	3,76	1,62	[48]
Медь	8,94	4,34	2,90	4,96	1,62	5,16	2,14	[141]
Молибден	10,19	6,72	3,29	6,48	3,73	8,19	2,39	[141]
Натрий (—183° С)	1,01	2,44	2,41	3,31	0,84	3,58	1,55	[141]
Никель	8,90	5,26	3,74	6,01	2,36	6,24	2,90	[141]
Оксид:								
бария	5,72	4,6921	2,4422	4,5326	2,60	4,61	2,57	[48]
магния	3,58	8,94	6,43	9,66	5,27	9,89	5,68	[141]
Палладий	12,13	4,28	2,43	4,73	1,42	5,06	1,86	[48]
Свинец	11,34	2,03	1,13	2,25	0,57	2,32	0,80	[141]
Селенит цинка	5,42	4,07	2,73	4,55	1,82	4,75	2,19	[48, 152]
Серебро	10,49	3,41	2,07	3,79	1,20	3,92	1,55	[141]
Силикат висмута	9,21	3,83	—	—	—	—	—	[168]
Силикатное железо	7,19	5,68	4,33	6,76	2,30	7,09	3,13	[48]
Стронций азотнокислый	2,99	3,98	2,21	4,05	2,07	3,79	2,12	[48]
β-Сульфид цинка	4,10	4,90	3,31	5,5	2,09	5,74	2,56	[48]
Теллурит:								
ртути	8,08	2,58	1,62	2,87	1,03	2,96	1,26	[48]
кадмия	5,85	3,02	1,87	3,34	1,20	3,44	1,46	[48]
Титанат стронция	5,12	7,876	4,910	8,098	4,918	8,141	4,703	[48]
Торий	11,66	2,54	2,02	3,07	1,06	3,22	1,45	[141]
Феррит кобальтоцинковый	5,43	7,00	3,80	7,28	3,23	7,37	3,42	[48]
Флюорит (плавиковый шпат)	3,18	7,19	3,30	6,68	4,24	6,50	3,95	[141]
Фосфид галлия	4,13	—	4,13	6,32	—	—	—	[150]
Фтористый:								
барий	4,89	4,3	2,2	4,3	2,3	4,3	2,3	[153]
литий	2,64	6,63	4,90	7,40	3,54	7,60	4,16	[141, 144]
магний	3,98	6,64	3,72	—	4,16	—	—	[48, 135]
натрий	2,79	—		$v_L = 5{,}66$*; $v_S = 3{,}33$*				[165]
Хлорат натрия	2,49	4,47	2,17	4,18	2,68	4,09	2,52	[141]
Хлористый:								
калий	1,99	4,52	1,77	3,89	2,9	3,61	2,59	[141, 144]
натрий	2,17	4,79	2,44	4,50	2,92	4,45	2,78	[144, 145]
серебро	5,57	3,29	1,06	3,13	1,47	3,07	1,35	[141]
цезий	3,99	3,04	1,42	2,78	1,85	2,69	1,71	[48, 148]

* Направление распространения волны не указано.

Таблица 7.18. **Скорость звука в гексагональных кристаллах ($t \approx 20°$ С)**

Кристалл	ρ, 10^3 кг/м^3	v, 10^3 м/с					Литература
		L_{100}	L_{001}	$S_{001}^{\text{произв}}$	S_{100}^{001}	Другие кристаллографические направления	
Бериллий	1,87	12,25	13,41	9,11	9,10	12,7 (L_{011}); 9,04(S_{100}^{010})	[48, 141]
Ванадат-германат свинца	7,15	—	3,45	1,54	—	3,11 (L_{010}), 1,66 (S_{010}^{100}), 1,49 (S_{010}^{001})	[48, 170]
	—	—	3,427	—	—		[48]
Ванадат-силикат свинца	7,02	—	3,62	1,73	—		[48, 171]
Иодат лития	4,5	4,13	4,3	1,99	—		[48]
Иттрий	4,48	—	4,14	2,33	—		

Кристалл	ρ, 10^3 кг/м^3	v, 10^3 м/с					Литература
		L_{100}	L_{001}	$S_{001}^{\text{произв}}$	S_{100}^{001}	Другие кристаллографические направления	
Кадмий	8,64	3,56	3,74	1,46	1,46	2,44; 2,33 (L_{011})	[48,141]
		3,74	—	1,34	1,34	2,01; 2,05 (S_{100}^{010})	
Канкринит	2,42—2,48	—	5,81	3,12	—		[48]
β-Кварц (580° С)	2,53	—	6,61	3,78	—		[48]
Кобальт	8,79	5,91	—	2,93	2,93	6,38 (L_{011}); 2,84 (S_{100}^{010})	[141]
Лед (—16° С)	0,94	3,83	—	1,84	1,84	3,99 (L_{001}); 1,90 (S_{100}^{010})	[141]
Магний	1,79	5,84	—	3,06	3,06	5,94 (L_{011}); 3,09 (S_{100}^{010})	[141]
Оксид цинка	5,64	6,0776	6,0961	2,7353	2,7350		[172]
Ортоселеноарсенит таллия	7,83	—	2,10	1,21	—		[169]
Рений	20,53	—	5,92	2,87	—		[48]
Рутений	12,1	—	7,28	3,95	—		[48]
Селенид кадмия	5,68	3,630	3,856	1,521	1,592		[173]
Сульфид:							
кадмия	4,82	4,181	4,414	1,757	1,7565		[151, 174]
цинка	4,1	5,512	5,582	2,647	2,652		[173]
Титанат бария	5,5	—	5,50	2,79	—		[48]
Цинк	7,18	4,73	—	2,31	2,31	2,92 (L_{011}); 2,97 (S_{100}^{010})	[141]

Таблица 7.19. **Скорость звука в тетрагональных кристаллах** ($t \simeq 20°$ С)

Кристалл	ρ, 10^3 кг/м^3	v, 10^3 м/с										Литература
		L_{100}	L_{010}	L_{001}	L_{110}	S_{100}^{010}	S_{100}^{001}	S_{010}^{100}	S_{001}^{110}	$S_{110}^{\bar{1}10}$	S_{110}^{100}	
Бастрон, ниобат бария-стронция $Sr_{(0,75—0,5)}Ba_{(0,25—0,5)}Nb_2O_6$	5,4	—	—	5,5	—	—	—	—	—	—	—	[151]
Дигидрофосфат аммония $NH_4H_2PO_4$	1,80	6,15	—	4,35	—	1,83	—	—	—	—	—	[151,176]
Каломель Hg_2Cl_2	6,97	1,6224	—	3,3434	—	1,3054	—	—	—	0,3471	—	[177]
Молибдат свинца $PbMoO_4$	6,95	3,98	—	3,632—3,750	—	2,20	1,961—1,980	—	—	—	—	[178—182]
Парателлурит TeO_2	5,9	3,051	—	4,14—4,30	—	3,317	2,100	—	2,08	0,616—0,618	—	[181, 185—188]
Рутил TiO_2	4,28	7,929—8,014	7,929—7,958	10,94	9,935—9,950	6,756	5,424	6,700	5,399	3,300	5,389	[181,183, 184]
Титанат свинца $PbTiO_3$	7.95	—	—	4.19	—	—	—	—	—	—	—	[189]
$TlInSe_2$	7,18	2,48	2,48	2,48	—	1,35*		—	—	—	—	[169]
$TlGaSe_2$	6,34	3,25	—	2,67	—	0,767*		—	—	—	—	[169]
$TlGaS_2$	5,72	3,0	—	2,5	—	1,0*		—	—	—	—	[169]

* Поляризация не указана.

Таблица 7.20. Скорость звука в тригональных кристаллах ($t \simeq 20°$ С)

Кристалл	ρ, 10^3 кг/м^3	v, 10^3 м/с										Литература
		L_{100}	L_{010}	L_{001}	S^{010}_{100}	S^{001}_{100}	S^{100}_{010}	S^{001}_{010}	$S^{100,010}_{001}$	S^{*}_{010}	QS_{010}	
Германат свинца	7,29	3,01	—	3,47	—	—	1,67	—	—	—	—	[190]
Кварц	2,65	5,747—5,7509	6,0061—6,0070	6,318—6,325	3,2978	5,1145	—	—	4,687—4,6895	3,9158—3,9169	4,3207—4,3249	[137, 191—194, 196]
Киноварь	8,10	—	—	2,450	—	—	—	—	—	—	—	[197]
Ниобат лития	4,62	6,54—6,54873	6,829—6,8822	7,271—7,3328	4,034—4,0593	4,76—4,8012	3,94—3,9615	4,457—4,4943	3,57—3,59	4,46—4,46667	—	[198—204, 209]
Пруспит	5,63	3,2	2,98	2,60	—	—	—	—	1,28	1,50	—	[204]
Сапфир	3,97	11,03—11,235	—	11,15	5,72	6,780	—	—	—	—	—	[205—207]
Теллур	6,25	2,41	—	2,3	—	—	1,47*					[135—208]

* Поляризация не указана.

Таблица 7.21. Скорость звука в ромбических кристаллах

Кристалл	ρ, 10^3 кг/м^3	v, 10^3 м/с						Другие кристаллографические направления	Литература
		L_{100}	L_{010}	L_{001}	S^{010}_{100}	S^{001}_{100}	S^{001}_{010}		
Банан, ниобат бария — натрия	5,41	3,365	3,415	3,075	—	—	—		[210]
Бифталат:									
калия	1,64	3,382	2,892	3,347	1,996	2,137	1,774		[211]
рубидия	1,93	3,21	2,68	2,85	—	—	—		[212]
цезия	2,18	3,27	2,51	2,54	—	—	—		[212]
Германат лития	3,50	6,50—6,66	—	—	—	3,72—3,75	4,04—4,10		[213, 214]
Германат натрия кобальта	—	5,54	5,26	5,43	3,23	—	—	2,24* (S_{001})	[215]
Дигидрофосфат калия	2,34	5,41—5,50	—	4,86	—	—	—		[151]
Иодноватая кислота	4,63—5,00	3,65	2,89	2.44	1,84	—	—		[216]
Молибдат гадолиния	4,58	3,368—3,900	3,853—3,995	4,646	2,340—2,708	—	2,349—2,360	4,500 (L_{110}); 4,135(L_{110}); 2,383* (S_{001}); 2,360* (S_{001})	[217—219]
Ортоселенофосфат таллия	6,1	2,2	2,2	2,2	1,1	—	—		[169]
Ортосульфатарсенид таллия	—	2,15	—	—	—	—	—	1.21* (S_{001})	[214, 220]
Сульфоиодид сурьмы	5,25	2,1—2,7	—	—	—	—	—	1,7($L_{\perp 001}$); 1,0*($S_{\perp 001}$)	[221]
Танталат лития	7.45	5,550—5,5522	5,6917	6,160—6,476	3,3556	4,210	—	3,529 (S^{100}_{010})	[147, 150, 198—200]

* Поляризация не указана.

Таблица 7.22. **Скорость распространения поверхностных акустических волн**

Кристалл, точечная группа	Срез (плоскость)	Направление распространения	Скорость v_R, 10^3 м/с	$\Delta v_R/v_R$, 10^{-4}	Литература
Арсенид галлия, $\bar{4}3m$	Z	100	2,719	0; 1,18	[222]
		110	2,863	—	[223]
		$X+25°$	2,750	3	[224]
		$X+23°$	2,760	2,85	[225]
		$110+45°$	2,480	—	[225]
	X	100	2,332	—	[226]
		010	2,720	0	[227]
		110	2,773	8	[226]
		011	2,8645	3,40	[227]
		210	2,725	70	[226]
	XY	001	2,819	1,16	[222]
		100	2,542	13	[226]
			2,820	0,95	[227]
		110	2,399	—	[223]
			2,512	19	[226]
		111	2,694	62	[226]
	111	110	2,428	—	[222]
		112	2,525	—	[226]
		$2\bar{1}\bar{1}$	3,0826	0	[227]
	211	111	2,621	1,2	[248]
Антимонид индия, $\bar{4}3m$	Z	100	1,84	—	[228]
Банан	X	$Y+45°$	3,32	12	[228]
	Y	001	3,177	5	[227]
		100	3,46	0	[227]
Берлинит, 32	X	$Y+19°$	2,754	24	[229]
		$Y+175,2°$	2,865	26,4	[229]
Борат лития	X	001	3,51	40	[135]
Ванадосульфат таллия, $\bar{4}3m$	X	100	0,870	—	[169]
Галлат:					
висмута	X	110	1,61	$\bar{\kappa} = 1{,}76\%$	[230]
лития	X	010	3,173	55	[231]
Германий, $m3m$	Z	100	2,934	0,1	[155]
	XY	001	3,015	0,1	[155]
	111	110	2,683	—	[155]
Германат висмута, 23	Z	110	1,681	68	[232]
		100	1,620	0	[223]
		$X+30°$	1,654	55	[223]
	XY	001	1,5935	22	[227]
			1,620	37	[233]
	111	$1\bar{1}0$	1,7812	0	[227]
		$1\bar{1}0$	1,708	82	[232]
Иодат лития,6	X	001	1,909	26,2	[234]
	Z	100	2,258	443	[234]
	X	010	3,256	—	[235, 236]
Кварц, 32	Y	100	3,154	—	[235, 236]
			3,159	9	[232]
	Z	010	3,258	—	[232]
			3,2617	—	[228]
	YX		3,1616	—	[238]
	ST	100	3,158	5,8	[232]
				6,7	[247]

Кристалл, точечная группа	Срез (плоскость)	Направление распространения	Скорость v_R, 10^3 м/с	$\Delta v_R/v_R$, 10^{-4}	Литература
Кварц плавленый	—	—	3,411	—	[223]
Керамика:					
ЦТС-23	—	—	2,253	—	[238]
ПКР-2	—	—	1,8507	—	[238]
РТ-4	—	—	2,2	220	[135]
Кремний, $m3m$	Z	100	4,92	—	[228]
Молибдат свинца, $4/m$	X	010	1,457	—	[135]
	Y	100	1,458793	—	[248]
	Z	100	3,798	260	[227, 239, 240]
Ниобат лития, $3m$	X	001	3,483	252	[227, 239, 240]
	Y	001	3,488	241	[227, 239, 240]
	$Y+16,5°$	100	3,503	268	[232]
	$Y+41,5°$	100	4,000	277	[232]
	$Y+127,86°$	100	3,950	—	[225]
Оксид:					
магния, $m3m$	Z	100	5,513	120	[241]
	XY	001	5,640	118	[241]
цинка, $6mm$	111	$\bar{1}10$	5,114	—	[241]
	X	010	2,8378	17,44	[227]
		001	2,7524	0	[227]
	Z	Любое	2,80	0	[227]
			2,64	45	[135]
Парателлурит, 422	Z	$Y+40°$	1,4	—	[242]
	X	110	1,673	83	[135]
Селен	Y	100	0,813	$k=1,7\%$	[135]
		001	1,54	$k=0,8\%$	[135]
Силикат висмута, 23	Z	110	1,66	—	[168]
	111	110	1,61	—	[168]
	XY	110	1,748	$\kappa=1,5\%$	[135]
		001	1,601	4	[135]
Сульфид кадмия, $6mm$	X	010	1,7302	0	[243]
		001	1,7177	26,1	[243]
	Y	100	1,700	—	[222]
		001	1,716	2,6	[223]
		$\perp 001$	1,720	31	[235]
	Z	Любое	1,7308	23,6	[243]
Танталат лития, $3m$	Y	100	3,148	3,7	[232]
		001	3,230	33	[227, 232]
	Z	100	3,205	11,4	[232]
		010	3,329	59	[232]
	$Z+22°$	100	3,302	27	[227, 232]
Танталоселенат таллия, $\bar{4}3m$	XY	$1\bar{1}0$	0,85	—	[244]
		001	0,77	—	[244]
Титанат висмута	XY	$110+55°$	1,72	$k=1,58\%$	[245]
Фосфид галлия, $\bar{4}3m$	Z	100	3,37	0	[224]
		$X+23°$	3,42	1,1	[224]
		$X+45°$	3,09	0	[224]
Фресноит, $4mm$	X	010	2,827	23	[135]
	Y	001	2,50	5	[239]
	Z	100	2,678	80	[239]
	$Z+45°$	100	2,655	75	[135]
Фтористый литий, $m3m$	Z		3,897	—	[155]
	XY		4,060	—	[155]
	111		3,458	—	[155]
Хлористый калий, $m3m$	Z	100	1,753	—	[241]

Примечание. k — коэффициент электромеханической связи.

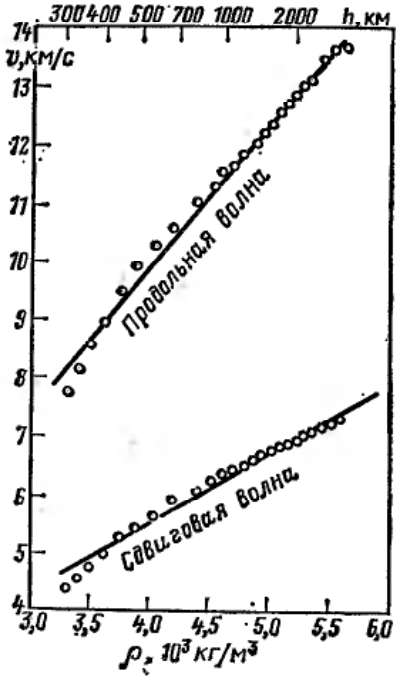


Рис. 7.27. Зависимость скорости звука в мантии Земли от глубины (плотности) [128]

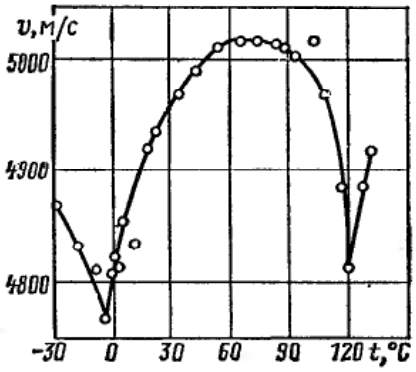
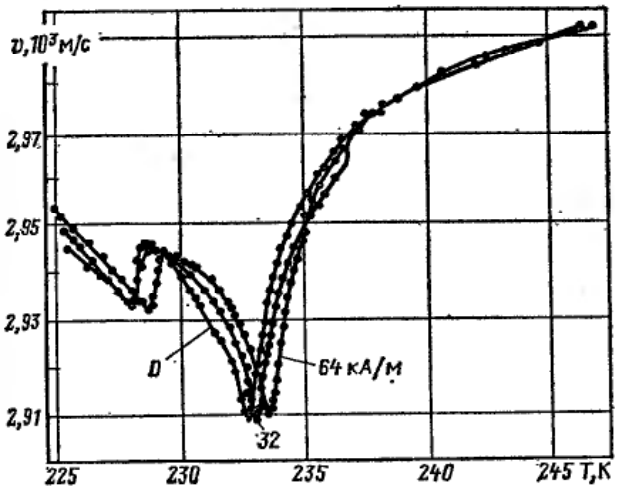


Рис. 7.28. Зависимость скорости звука от температуры в поляризованной керамике титаната бария (продольные колебания по толщине пластинки) [175]



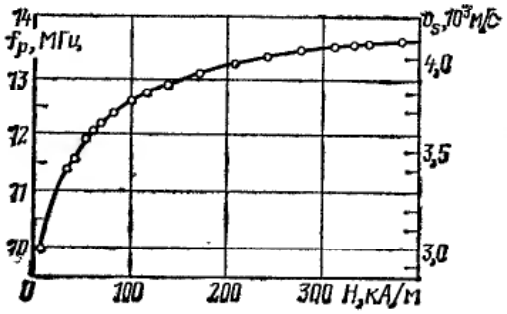


Рис. 7.30. Зависимость от напряженности магнитного поля резонансной частоты колебаний сдвига в пластинке естественного кристалла гематита (α—Fe_2O_3) v_s — эффективная скорость; направление поля нормально к плоскости пластинки и совпадает с тригональной осью; «легкая плоскость» — в плоскости пластинки [249], см. также [250]

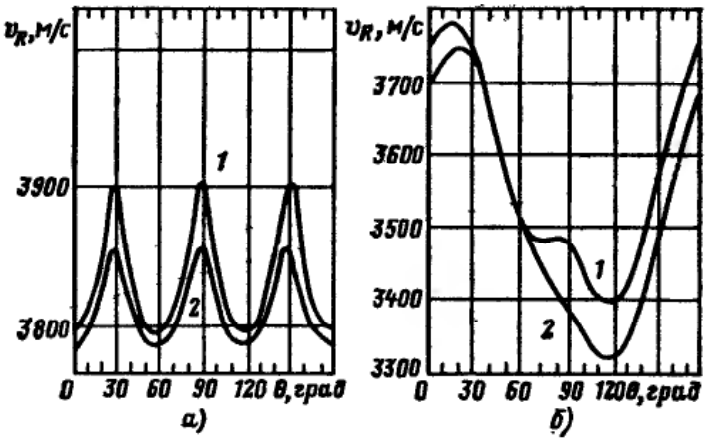


Рис. 7.31. Анизотропия скорости ПАВ в $LiNbO_3$:
а — *Z*-срез, θ — угол между осью *X* и волновой нормалью; *б* — *X*-срез; θ — угол между осью *Y* и волновой нормалью; *1* — на свободной поверхности; *2* — на металлизированной поверхности [251]

Рис. 7.29. Зависимость скорости продольной волны (30 МГц) вдоль гексагональной оси в тербии от температуры при разной напряженности магнитного поля: в области точки Кюри (~228 К) и точки Нееля (~233 К) [195]

Таблица 7.23. **Затухание звука в природных материалах**

Порода	Диапазон частот, Гц	Тип возбуждения	Q	Литература
Гранит (квинсли)	140—1600	Продольный резонанс	100	[253]
	140—1600	Кручение, изгибный резонанс	150—200	[253]
Гранит	50—120	Изгиб	57	[254]
	$5 \cdot 10^4 \div 4 \cdot 10^5$	Релеевские волны	79	[255]
Долорит	50—120	Изгиб	90	[254]
Диорит	50—120	»	125	[254]
Известняк	$5 \cdot 10^6 \div 10^7$	Продольные импульсы	190—110	[256]
	$3 \cdot 10^6 \div 15 \cdot 10^7$	Сдвиговые импульсы	400	[256]
хантонский	$(2{,}8 \div 10{,}6) \cdot 10^3$	Продольный резонанс	65	[257]
соленхофенский	$(3 \div 9) \cdot 10^6$	Сдвиговые импульсы	190	[254]
ракушечник	50—120	Изгиб	63	[254]
оолитовый	50—120	»	45	[257]
Песчаник амхерстовский	$930 \div 12{,}8 \cdot 10^3$	Продольный резонанс	52	[254]
Песчаник	50—120	Изгиб	21	[254]
Покрывающие породы	$(1{,}1 \div 6{,}6) \cdot 10^3$	Продольный резонанс	45	[257]
	$100 \div 2 \cdot 10^3$	Сдвиговый резонанс	52	[257]
Сланец глинистый сильванский	$(3{,}4 \div 12{,}8) \cdot 10^3$	Продольный резонанс	73	[257]

Таблица 7.24. **Затухание звука в металлах, стеклах и пластмассах**

Вещество	Диапазон частот, Гц	Тип возбуждения	Добротность Q, 10^3	α/f, 10^{-7} с/м	Литература
Алюминий	$(3{,}1 \div 7{,}5) \cdot 10^6$	Продольные импульсы	5,9	0,85	[258]
	$(5 \div 15) \cdot 10^6$		7,63	0,64	[258]
	$(3{,}5 \div 4{,}5) \cdot 10^6$	Сдвиговые импульсы	19,4	0,53	[258]
	$(3 \div 6{,}8) \cdot 10^6$		17,2	0,59	[258]
	$(1 \div 200) \cdot 10^5$	Продольный резонанс	150	0,03	[259]
монокристалл в направлении 110	$(1{,}5 \div 6) \cdot 10^7$	Продольные импульсы	1,09	4,6	[260]
Латунь	10^7	То же	—	70	[267]
	$9 \cdot 10^6$	Сдвиговые импульсы	—	160	[267]
Магний	$(2 \div 100) \cdot 10^3$	Продольные волны	4,9	1,08	[258]
	$(7 \div 76) \cdot 10^6$	Продольные импульсы	0,965	5,5	[262]
Медь:	10—18	Продольное	2,14	3,10	[263]
	$(2{,}5 \div 30) \cdot 10^3$	Продольный резонанс	2,18	3,10	[264]
	$(2{,}5 \div 30) \cdot 10^3$	Сдвиговый резонанс	4,38	3,20	[264]
	1—6	Изгиб	0,98	—	[265]
	11—25	»	0,64	—	[266]
неотожженная	$(1{,}5 \div 6{,}5) \cdot 10^7$	Продольные импульсы	1,77	3,6	[260]
отожженная	$(2{,}5 \div 7{,}5) \cdot 10^7$	То же	5,83	1,1	[260]
Молибден	8—30	Изгиб	0,465	—	[266]
Монель	8—32	»	1,40	—	[266]
Никель:					
монокристалл	10^7	Продольные волны	—	1,0	[268]
поликристалл	$8 \cdot 10^6$	Продольные импульсы	—	102	[267]
	$2{,}5 \cdot 10^6$	Сдвиговые импульсы	—	233	[267]
	12—33	Изгиб	0,96	—	[266]
Органическое стекло	10^6	Продольные волны	—	250	[256]
Плавленый кварц	$(0{,}2 \div 1{,}5) \cdot 10^7$	Сдвиговые волны	—	0,19	[258]
	$5 \cdot 10^8$	То же	—	0,1	[150]
	$(0{,}2 \div 1{,}5) \cdot 10^7$	Продольные волны	—	1,23	[258]
	$5 \cdot 10^8$	То же	—	0,7	[150]
Полистирол	10^6	»	—	170	[256]
Полиэтилен	10^6	»	—	520	[256]
Свинец	$(1{,}6—15) \cdot 10^3$	Продольное	$3{,}6 \cdot 10^{-2}$	400	[264]
	$(1—9) \cdot 10^3$	Сдвиговое	$3{,}4 \cdot 10^{-2}$	1400	[264]
Сталь:	5—10	Продольное	5,0	1,0	[263]
	2—8	Изгиб	1,85	—	[265]
+3,5% Ni	8—25	»	1,36	—	[266]
вольфрамоуглеродистая	$(2—100) \cdot 10^3$	Продольное	—	0,38	[258]
молибденовая	$(2—100) \cdot 10^3$	»	—	1,42	[258]
Стекло:					
пирекс	$(2 \div 15) \cdot 10^6$	Продольные волны	—	4,89	[258]
свинцовое	$(2 \div 15) \cdot 10^6$	То же	—	3,21	[258]

Таблица 7.25. **Поглощение звука в кристаллах ($t = 20°$ С)**

Кристалл, сингония, точечная группа	Тип волны, направление распространения	Γ, дБ/мкс (f, ГГц)	α, 10^2 дБ/м (f, ГГц)	α/f^2, 10^2 дБ/(м·ГГц^2)
Антимонид индия, куб., $4\bar{3}\,m$ [135, 317, 274]	L_{100}	40(1)	4,8(0,11)	—
	L_{110}	8(0,5) 40(1)	—	—
	S_{100}	—	5,1(0,58)	—
	S_{110}^{001}	3,8(1) 5(1)	4,5(0,58)	—
	$S_{110}^{1\bar{1}0}$	8(1)	8,8 (0,58)	—
	S_{111}	—	6,2 (0,58)	—
Арсенид галлия, куб., $\bar{4}3m$ [135, 275]	L_{110}	0,6(0,2)	—	30 [227]
	L_{111}	4,0(0,5)	—	—
	S_{100}	0,7(0,2)	—	—
Банан, ромб., $mm2$ [276]	Вдоль c	—	0,1 (0,077) 0,4 (0,5) 250K	—
	Вдоль a	—	0,4 (0,5) 250K	—
Бастрон, тетр., $4mm$ [277, 135]	L_{001}	—	61 (0,1) $\leqslant$1,0 (0,5)	—
Бифталат калия, ромб., $2m$ [212]	L_{100}	1,1 (0,4)	—	—
	L_{010}	1,5 (0,4)	—	—
	L_{001}	0,68 (0,4)	—	—
	FS_{100}	0,35 (0,4)	—	—
	FS_{010}	0,56 (0,4)	—	—
Бифталат рубидия, ромб., $2m$ [212]	L_{100}	0,29 (0,4)	—	—
	L_{010}	0,90 (0,4)	—	—
	L_{001}	9,36 (0,4)	—	—
Бор, триг., $\bar{3}m$ [135]	L_{001}	0,15 (1)	—	—
Бромистый калий, куб., $m3m$ [282]	L_{100}	—	—	36*
	L_{110}	—	—	25*
	L_{111}	—	—	17*
	S_{100}^{001}, $S_{110}^{00\bar{1}}$	—	—	6*
	$S_{110}^{1\bar{1}0}$	—	—	40*
	$S_{111}^{1\bar{1}0}$	—	—	38*
Гадолиний, гекс. [313]	L_{001}	—	13 (0,05)	—
	S_{001}	—	0,4 (0,05)	—
Германий, куб., $m3m$ [135, 151, 279—282, 317]	L_{100}	1,3 (0,3) 11 (1)	23 (1)	29,6
	L_{110}	10 (1)	—	—
	L_{111}	4,2 (0,5)	—	30
	$S_{010}^{001}S_{110}^{1\bar{1}0}$	2 (1)	—	—
	S_{100}	0,29 (0,3)	10 (1)	9
Германат висмута, куб., 23 [135, 283]	L_{100}	—	2 (0,025)	—
	L_{001}	—	4 (0,8)	—
	L_{010}	0,11 (0,5)	4 (0,8)	—
Германат свинца, гекс., 6 [151, 190]	L_{100}	—	—	150
	L_{010}	—	2 (0,1)	—
	L_{001}	—	~30 (0,4)	—
Гранат: алюмоиттриевый, куб., $m3m$ [135, 150, 206, 279, 282, 284, 285]	L_{100}	0,07 (0,5) 0,6 (1,5)	0,2—0,32 (1)	—

Кристалл, сингония, точечная группа	Тип волны, направление распространения	Γ, дБ/мкс (f, ГГц)	α, 10^2 дБ/м (f, ГГц)	α/f^2, 10^2 дБ/(м · ГГц^2)
		1,8 (1,8)		
		5 (3)		
	L_{110}	15 (9,4)	—	0,25
	L_{111}	14 (9,4)	—	—
	S_{110}	7 (9,4)	0,4 (0,9)	1,1
	S_{100}	0,36 (1,5)	—	—
		0,7 (1)		—
галлиевоиттриевый, куб., $m3m$ [135]	L_{100}	0,1 (1)	—	—
	S_{100}	5,9; 18 (9)	—	—
	S_{110}			
железоиттриевый, куб., $m3m$ [135, 151, 279, 286, 312]	$L_{110} = L_{111}$	1,0 (1)	—	—
	L_{100}	1,0 (1)	2 (1)	1,1
		0,6 (1,5)	3,2 (1,12)	
	S_{100}	0,13 (1)	0,34 (1)	0,35
Германованадат свинца, гекс. $6/m$ [170]	L_{010}	—	0,8 (0,1)	—
			2,1 (0,3)	
	L_{001}	—	0,5 (0,1)	—
			2,1 (0,3)	
Иодат лития, гекс., 6 [135, 171, 287]	L_{100}	1,1 (0,15)	—	—
	L_{002}	9,1 (0,15)	20 (0,002)	
			36 (0,008)	—
			7,5 (0,14)	
	$S^{001}_{100,\ 010}$	1,6 (0,15)	—	—
	$S^{\perp 001}_{100,\ 010}$	0,29 (0,15)	—	—
Иодноватая кислота, ромб., 222 [135, 216]	L_{010}	0,73 (0,5)	2,5 (0,5)	—
	L_{001}	0,61 (0,5)		—
Карбид кремния, гекс., $6mm$ [135]	L_{0001}	56 (9,4)	—	—
	L_{1010}	50 (9,4)	—	—
	S_{0001}	22 (9,4)	—	—
	S_{1010}	19 (9,4)	—	—
Кварц, триг., 32 [135, 206, 288, 290, 291]	L_{001}	1,3 (1)	—	3,25 [289]
	L_{100}	1,7 (1)	1,3 (0,73)	4,2 [289]
		3,5 (1,8)	9,0 (1,96)	3,0 [151]
			26,3 (3,38)	
	S^{001}_{100}	—	0,2 (0,5)	—
		3,5 (1,8)	—	—
	S_{010}	—	2 (1,01)	—
	S_{001}	1,65 (1,5)	—	—
	S_{AC}	—	~8 (0,5)	—
KRS-5, куб., $m3m$ [135, 292]	L_{111}	0,3 (0,1)	—	—
	L_{110}	—	0,8 (0,1)	—
KRS-6, куб, $m3m$ [293]	L	7 (1)	4,55 (0,4)	—
Киноварь, триг., 32 [135, 197]	L_{001}		7,1 (0,5)	
		7 (1)	7,6 (1,03)	—
Кремний, куб., $m3m$ [135, 274, 317]	L_{100}	7,1 (1)		
		6 (1)	—	—
	L_{110}	2,3 (0,5)	5,9 (1,03)	6,5 [151]
	L_{111}	6 (1)		
	S_{100}	1,4 (1)	2,2 (1)	—
	FS_{110}	1,6 (1)	2,55 (1,03)	—
		—	2,5 (0,5)	—
Молибдат свинца, тетр., $4/m$ [180, 181, 295]	L_{100}	1,0 (0,5)	0,3 (0,1)	—
	L_{001}			
	S^{001}_{100}	—	0,16 (0,2)	—
		—	4,2 (0,3)	—
Молибдат свинца двойной, $2/m$ моноклин. [135, 296, 297]	L_{100}	—	~4 (0,1)	—
	L_{010}	—	2,5 (0,5)	—
	L_{001}			

Кристалл, сингония, точечная группа	Тип волны, направление распространения	Γ, дБ/мкс (f, ГГц)	α, 10^2 дБ/м (f, ГГц)	α/f^2, 10^2 дБ/(м · ГГц^2)
Никель, куб., $m3m$ [315]	L_{110}	—	~5 (0,09) ~0,7 (0,0058)	— —
	$S^{001}_{1\bar{1}0}$	—	1,8 (0,0095) 4,6 (0,029)	—
Ниобат лития, триг., $3m$ [135, 158, 202, 203, 209, 294]	L_{100}	—	0,29 (0,4) 1,39 (1) 0,86 (1)	—
	L_{010}	0,065 (0,5)	0,16 (0,4) 0,78 (1) 0,71 (1)	—
	L_{001}	0,03 (0,5) 1,3 (2)	0,03 (0,4) 0,17 (1) 0,32 (1) 0,34 (1)	—
	S_{100}	0,07 (0,5)	FS: 0,17 (0,4); 1,04 (1); 0,81 (1); 1,71 (1,1); 4,98 (2) SS 0,66 (1)	—
	S_{010}	—	FS: 0,17 (0,4); 0,96 (1); 0,73 (1); 1,05 (1,1); 3,50 (2)	—
			SS: 0,14 (0,4); 1,13 (1); 1,24 (1); 2,31 (1,1); 5,81 (1,74)	—
	S_{001}	5,0 (2,3)	0,39 (0,4) 2,44 (1) 4,3 (1)	—
Оксид:				
бериллия, гекс., $6mm$ [135]	L_{0001}	1,3 (1)	—	—
магния, куб., $m3m$ [135, 275, 279, 282, 298, 299, 317]	L_{100}	3 (1) 4,5 (1)	3,30 (1)	—
	L_{110}	1,5 (1)	—	—
	L_{111}	1,0 (1)	—	—
	L_{0001}	1,0 (0,2) 4,4 (1)	0,04 (0,1) 15 (1)	—
	S_{100}	0,21 (1)	0,44 (1)	—
	S^{001}_{110}	0,6 (1)	—	—
	$S^{1\bar{1}0}_{110}$	6,5 (1)	—	—
цинка, гекс., $6mm$ [275]	S	0,5 (0,2)	—	—
Ортосиликат висмута, куб., $\bar{4}3m$ [283]	L_{111}	—	—	0,95
	S^{001}_{110}	—	—	0,75
Парателлурит, тетр., 422 [135]	L_{001}	3 (1)	—	6,5** [297]
	$S^{1\bar{1}0}_{110}$	18 (1)	—	16** [297]
Пираргирит, триг., $3m$ [300]	L_{100}	—	1,3 (0,003)	—
Прустит, триг., $3m$ [301, 302, 135]	L_{100}	1,5 (0,56)	—	—
	L_{001}	0,25 (0,05) 2,5 (0,56)	~8 (0,5)	4,5** [297]

Кристалл, сингония, точечная группа	Тип волны, направление распространения	Γ, дБ/мкс (f, ГГц)	α, 10^2 дБ/м (f, ГГц)	α/f^2, 10^2 дБ/(м · ГГц^2)
Рутил, тетр., $4/mmm$ [135, 141, 150, 206, 303]	L_{100}	1,9 (1)	—	—
	L_{110}	2,5 (1)	—	—
	L_{001}	0,1 (0,5) 0,6 (1) 7 (1,8)	0,5 (0,5)	—
	S_{001}	0,22 (1)	3,4 (2,8)	0,55 [151]
Рубин, триг., $\bar{3}m$ [305—307]	L	0,2 (0,6)	—	—
	L_{100}	19 (9,4)	—	—
	L_{001}	15 (9,4)	—	—
Сапфир, триг., $\bar{3}m$ [135, 150, 206]	L_{100}	0,05 (0,5) 1 (1,8) 16,5 (9)	—	—
	$L_{11\bar{2}0}$	—	—	0,2 [151, 309]
	L_{0001}	0,22 (1)	—	0,2 [151, 309]
	$FQS\|\|a$		0,5 (1)	—
	$SQS\|\|a$	1,4 (1)	2,3 (1)	—
	$QL\|\|a$		0,2 (1)	—
Селенид: кадмия, гекс., $6mm$ [135, 275]	L_{0001}	3,0 (0,2)	—	—
	$S_{10\bar{1}0}$	0,5 (0,2) 2,0 (0,2)	—	—
ртути [318]	L_{110}	—	~3 (0,075)	—
	$S_{110}^{\bar{1}10}$	—	~3,2 (0,075)	—
Силикат висмута, куб., 23 [283]	L_{111}	—	5 (0,8)	—
	S_{110}^{001}	—	2 (0,8)	—
Сульфид кадмия, гекс., $6mm$ [135, 275]	L_{100}	—	—	90 [151]
	L_{0001}	3,5 (0,2) 80 (1)	— —	—
	$L_{11\bar{2}0}$	17 (1)	—	—
	$S_{10\bar{1}0}$	0,6 (0,2) 4,5 (1)	— —	—
Сфалерит, куб., $\bar{4}3m$ [151]	L_{001}	—	—	27
	S_{001}	—	—	130
Танталат: калия, триг., $3m$ [314]	L	0,45 (0,18)	—	—
лития, триг., $3m$ [135, 147, 150, 181, 294]	L_{100}	0,02 (0,5)	0,1 (0,5)	0,1 [150]
	L_{001}	0,01 (0,5)	0,02 (0,5)	
	S_{001}	4,4—6 (2,3)	—	—
Теллур, триг., 32 [135]	L_{100}	—	3—5 (0,5)	—
Титанат стронция, куб., $m3m$ [155, 310]	L_{100}, L_{010} L_{001}	1 (1)	1,7 (0,894)	—
	L_{111}	—	1 (0,972)	—
	S_{100}	—	1,5 (0,894)	—
	S_{110}	—	1,1 (0,77)	—
Турмалин, триг. $3m$ [135]	L_{001}	16(9)	—	—
Флюорит (плавиковый шпат), куб., $m3m$ [153]	L_{110}	0,4 (0,5)	—	—
	L_{111}	0,4 (0,5)	—	—
	SS_{110}	0,6 (0,5)	—	—
	FS_{110}	0,3 (0,5)	—	—
Фосфид галлия, куб., $\bar{4}3m$ [150, 282]	L_{110}	0,63 (0,4) 1 (0,5)	—	6 [311]

Кристалл, сингония, точечная группа	Тип волны, направление распространения	Γ, дБ/мкс, (f, ГГц)	α, 10^3, дБ/м (f, ГГц)	α/f^2, 10^3 дБ/(м · ГГц²)
Фтористый:				
барий, куб., $m3m$ [135, 153]	L_{100}	0,16 (0,2)	—	—
	L_{110}	0,16 (0,2)	—	—
	L_{111}	0,9 (0,5)	—	—
	S^{001}_{110}	0,5 (0,5)	—	—
литий, куб., $m3m$ [141, 317]	L_{100}	3,5 (0,9) 10 (1)	—	—
	L_{110}	1,3 (0,9) 2,5 (1)	—	—
	L_{111}	0,8 (0,9) 1,5 (1)	—	—
	S_{100}	0,8 (0,9)	—	—
	S_{110}	0,8 (0,9)	—	—
	S_{111}	5 (0,9)	—	—
магний, тетр., $4/mmm$ [135]	L_{001}	0,7 (0,5)	—	—
	S^{100}_{001}	0,45 (0,5)	—	—
натрий, куб., $m3m$ [317]	L_{100}	14 (1)	—	—
	L_{110}	6,5 (1)	—	—
	L_{111}	10 (1)	—	—
	S^{001}_{110}	1,0 (1)	—	—
	$S^{1\bar{1}0}_{110}$	12 (1)	—	—
стронций, куб., $m3m$ [153, 312]	L_{111}	0,7 (0,5) 2,5 (1)	—	
	S^{001}_{110}	0,5 (0,5)	—	—
	$S^{1\bar{1}0}_{110}$	0,6 (0,5)	—	—
Хлористый:				
калий, куб., $m3m$ [278]	L_{100}	—	—	36*
	L_{110}	—	—	25*
	L_{111}	—	—	18*
	S^{001}_{100}, S^{001}_{110}	—	—	5*
	$S^{1\bar{1}0}_{110}$	—	—	40*
натрий, куб., $m3m$ [135, 312]	L_{100}	3,6 (0,2) 30 (1)	—	18*
	I_{110}	0,56 (0,2) 20 (1)	—	11*
	L_{111}	0,28 (0,2) 10 (1)	—	7*
	S^{001}_{100}, S^{001}_{110}	—	—	1,9*
	$S^{1\bar{1}0}_{110}$	—	—	26*

* Приведены данные по Γ/f^2 в дБ/(мкс·ГГц²).
** Приведены данные по Γ/f^2 в дБ/(мкс·МГц²).

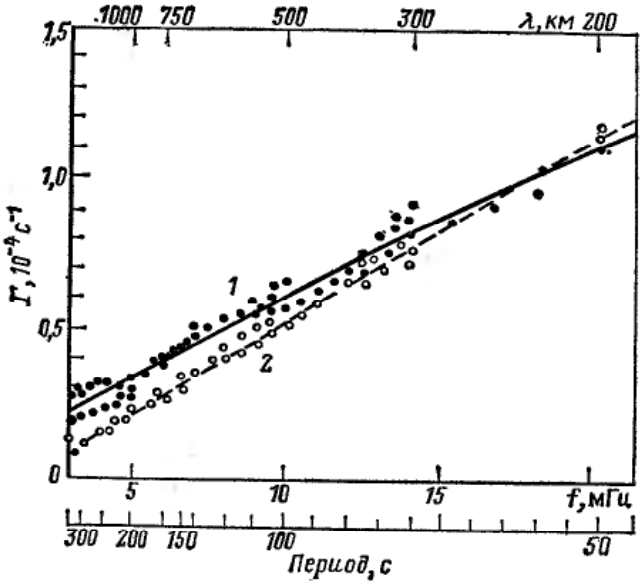
Таблица 7.26. Затухание релеевских поверхностных волн в кристаллах

Кристалл	Срез (плоскость)	Направление распространения	Г, дБ/мкс (f, ГГц)	α, 10^2 дБ/м, на частоте, ГГц [233, 234, 331]			
				0,1	0,2	0,4	1
Арсенид галлия	211	111	3,62 (1) [248]	—	—	—	—
	110	100	4,22 (1) [135]	—	—	—	—
	001*	110	12,8 (1) [135]	—	—	—	—
Банан	Y*	001	3,7 (1) [135]	—	—	—	—
Германат висмута	001*	110	1,64 (1) [248]	0,199	0,571	1,832	9,756
	111	$1\bar{1}0$	1,64 (1) [248]	—	—	—	—
	111	110	—	0,199	0,571	1,832	9,756
Иодат лития	Z	Любое	450 (1) [135]	—	—	—	—
Кварц			0,41 (0,316) [332]				
	Y**	100	4,1 (1,047) [332]	0,211	0,558	1,661	8,244
			2,6 (1) [248]				8,220
	ST	100	3.09 (1) [248]	0,232	0,630	1,897	9,733
							9,780
Ниобат лития	X	001	1,1—1,78 (0,9) [332]	0,079	0,210	0,621	3,06
			3,84 (1,95) [332]				3,04
	Y	100	0,93 (1) [227]	—	—	—	—
	Y***	001	1,07 (1) [227]	—	—	—	—
	Y + 16,5°	100	—	0,086	0,227	0,669	3,28
	Y + 41,5°	100	—	0,093	0,225	0,600	2,62
	Z — 41,5°	100	1,05 (1) [227]	—	—	—	—
Молибдат свинца	X	010	7,5 (1) [135]	—	—	—	—
Оксид цинка	Z	Любое	37 (1) [135]	—	—	—	—
Пьезокерамика PZT-4	—	Любое	6 (0,036) [135]	—	—	—	—
Танталат лития	Z	010	1,0 (1) [135]	0,092	0,230	0,646	3,004
	Y	001	1,14 (1) [135]	—	—	—	—

* $\Gamma = 1{,}45f^{1{,}9} + 0{,}19f$ [135].

** $\Gamma = 2{,}15f^{2} + 0{,}45f$ [135].

*** $\Gamma = 0{,}88f^{1{,}9} + 0{,}19f$ [135].



←

Рис. 7.32. Коэффициент затухания Г сейсмических волн Лява (*1*) и релеевских волн (*2*) в зависимости от периода (частоты, длины волны). Данные получены после обработки записей серии землетрясений [252]

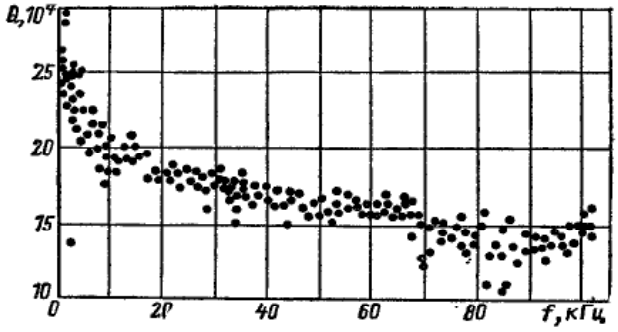


Рис. 7.33. Добротность продольных колебаний алюминиевых стержней в зависимости от частоты [259]

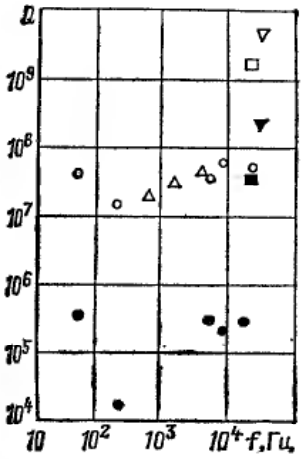


Рис. 7.34. Добротность низкочастотных резонаторов из различных материалов:
○ — алюминиевый сплав (Al-5056); △ — Nb [269]; □ — Si [270]; ▽ — Al_2O_3 [271]. Темные значки — $T=300$ К, светлые — $T=4{,}2$ К

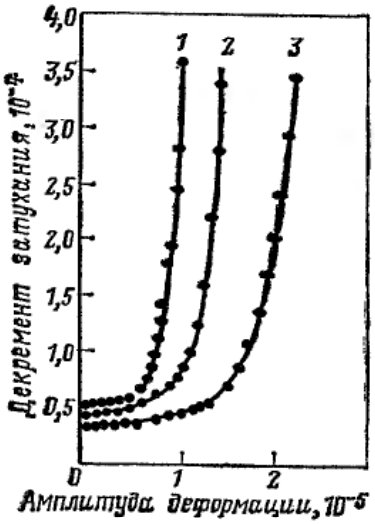


Рис. 7.35. Амплитудно-зависимое затухание в алюминии при $t=84$°С:
1 — неотожженный образец; *2* — отжиг (время возврата 3,5 ч); *3* — отжиг (13,5 ч) [272]

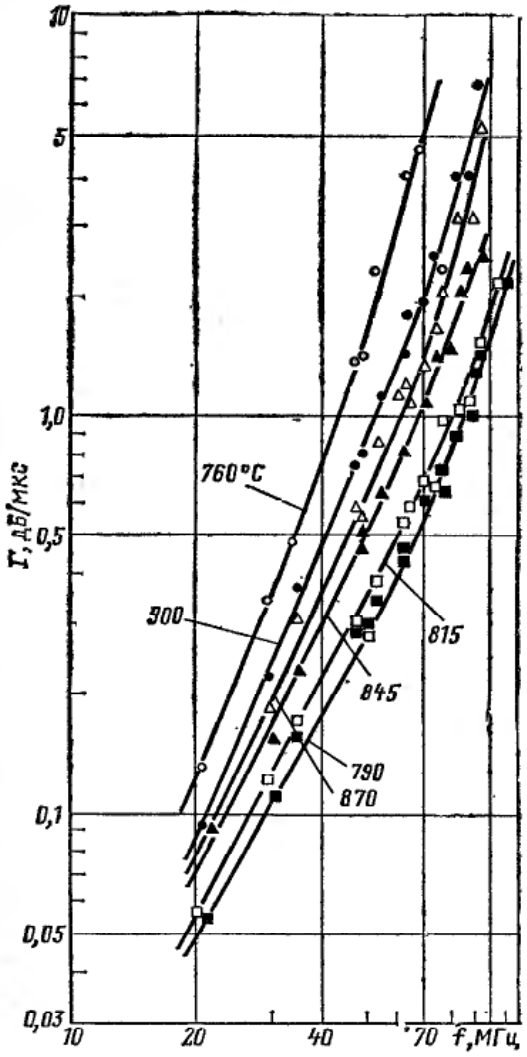


Рис. 7.36. Затухание продольных волн в закаленной штампованной стали (образцы аустенизированы при различной указанной температуре) [273]

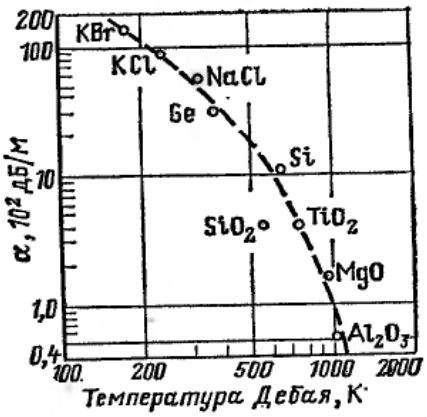


Рис. 7.37. Коэффициент затухания продольных волн (1 ГГц) при $T=300$ К как функция температуры Дебая. Направление распространения *L*-волны:
кубические кристаллы — [100], SiO_2 — *X*; TiO_2 и Al_2O_3 — с [319]

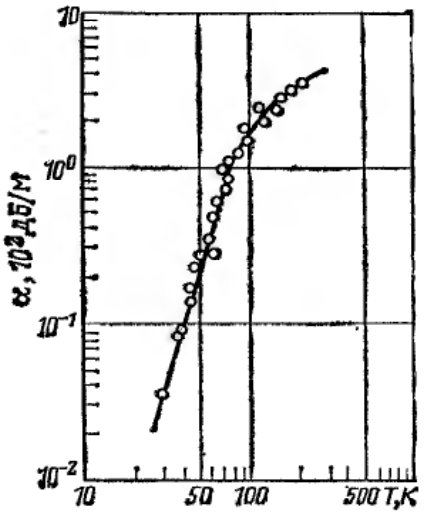


Рис. 7.38. Зависимость затухания в кристалле MgO от температуры (S_{100}-волна, 3 ГГц) [319]

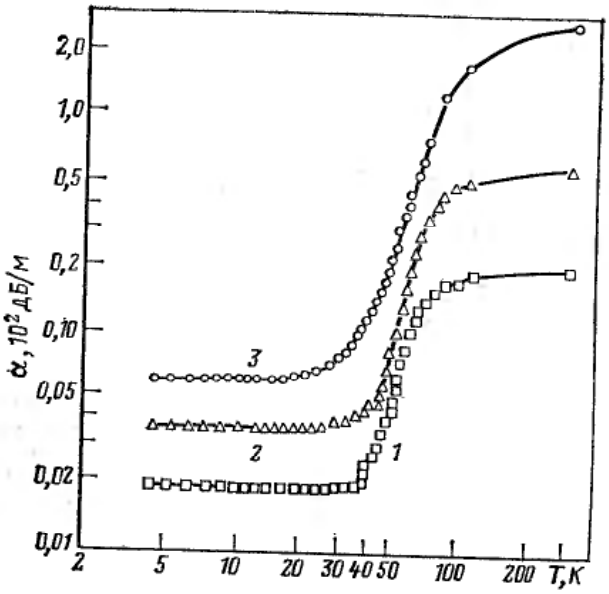


Рис. 7.39. Зависимость затухания звука на частоте 1 ГГц в Al_2O_3 от температуры для волн, распространяющихся вдоль оси *a*:

1 — продольная; *2*, *3* — быстрая и медленная поперечные волны [320]

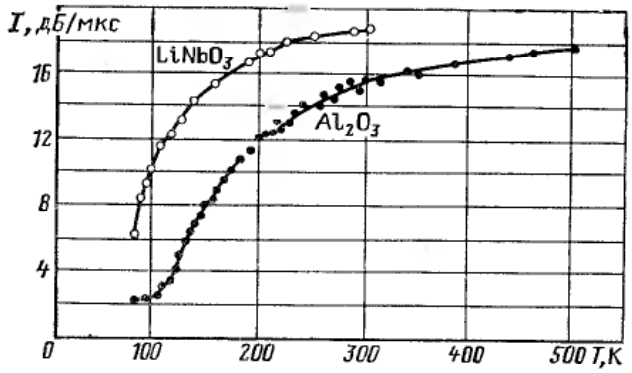


Рис. 7.40. Затухание *L*-волны вдоль тригональной оси кристаллов рубина и ниобата лития (9,4 ГГц) [321]

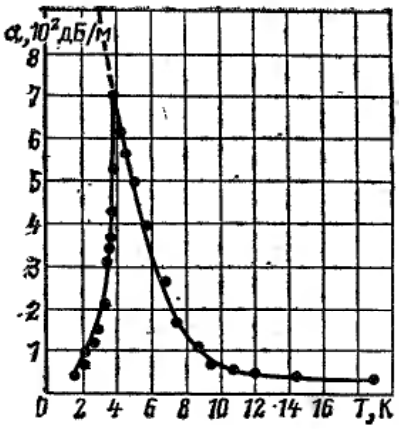


Рис. 7.42. Поглощение *L*-волны (10,3 МГц) в чистом олове в области перехода в сверхпроводящее состояние: пунктир — поглощение в нормальном состоянии [323]

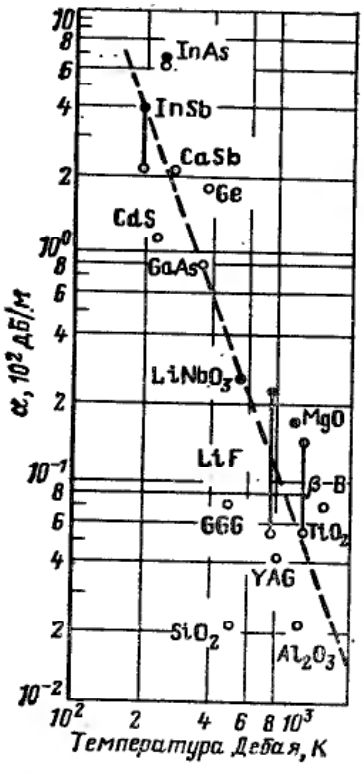


Рис. 7.41. Остаточное поглощение (1 ГГц) в зависимости от температуры Дебая [322]:

○ — *L*-волн; ● — *S*-волн

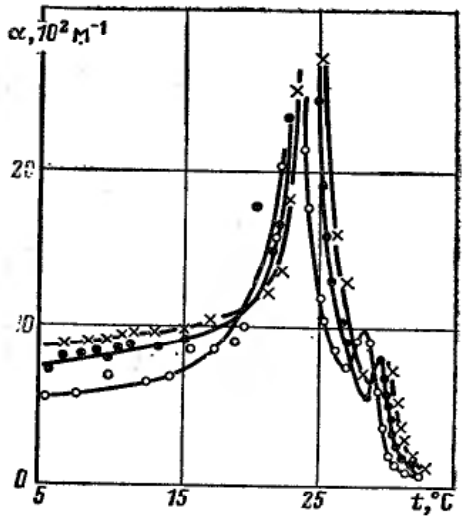


Рис. 7.43. Поглощение *L*-волны (10 МГц) вдоль оси *c* кристалла сульфоиодида сурьмы при различном сопротивлении образца [324]:

○ — 10^9 Ом; ● — $2 \cdot 10^9$ Ом; × — $3 \cdot 10^9$ Ом [324]

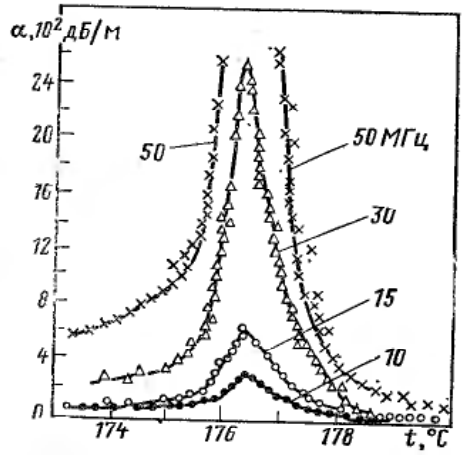


Рис. 7.44. Зависимость от температуры коэффициента поглощения L-волны вдоль оси Y в германате свинца [325]

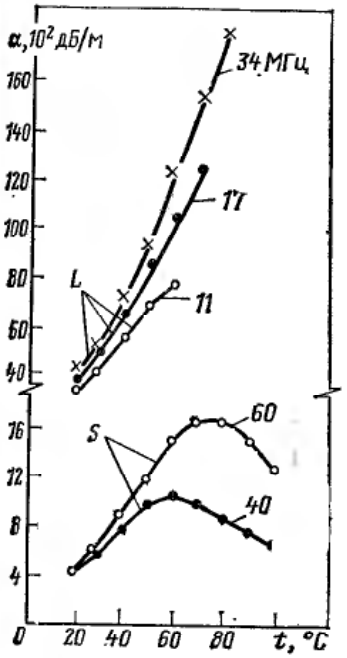


Рис. 7.45. Затухание пьезоактивных сдвиговых (S) и продольных (L) воли в иодате лития, $S \perp c, L \| c$ [326] (см. также [327])

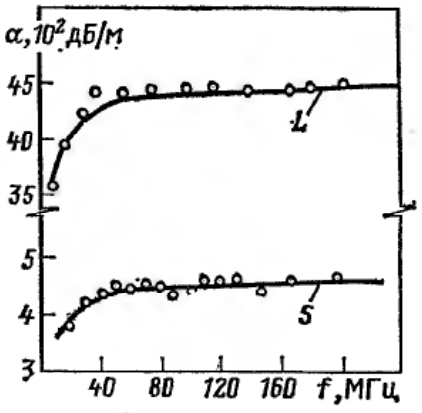


Рис. 7.46. Затухание при $t=20°$ С пьезоактивных сдвиговых и продольных волн в иодате лития [326]

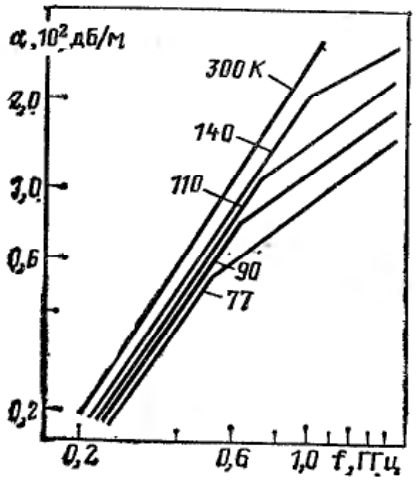


Рис. 7.47. Частотная зависимость поглощения SS_{110}-волны в n-кремнии. Излом соответствует переходу от затухания Ахиезера к затуханию Ландау-Румера [328]

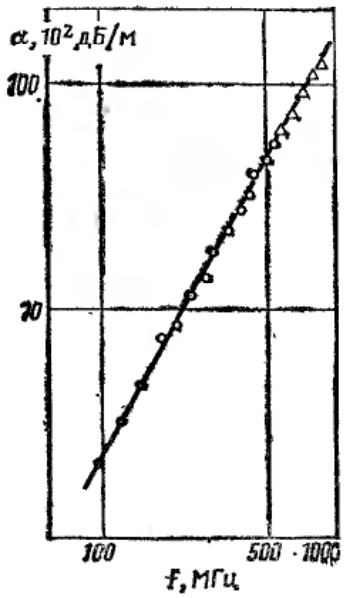


Рис. 7.48. Частотная зависимость затухания SS_{110}-волны в парателлурите ($\alpha=\alpha_0 f^{1,9}$, где $\alpha_0=3{,}6\cdot10^{-2}$ дБ/м, f в МГц; $t=18°$С) [329]

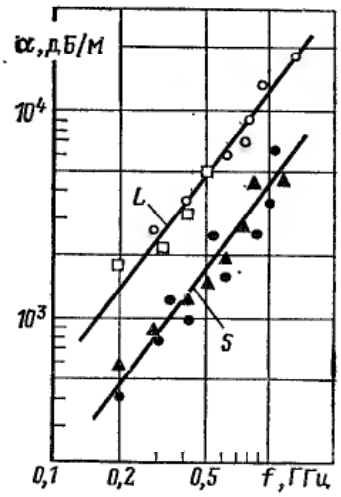


Рис. 7.49. Неэлектронное затухание L- и S-волн в сульфиде кадмия при 300 К. Волны распространяются под разным углом к оси c: ○, □ —40°; ● —0°; ▲ — 90° [330]

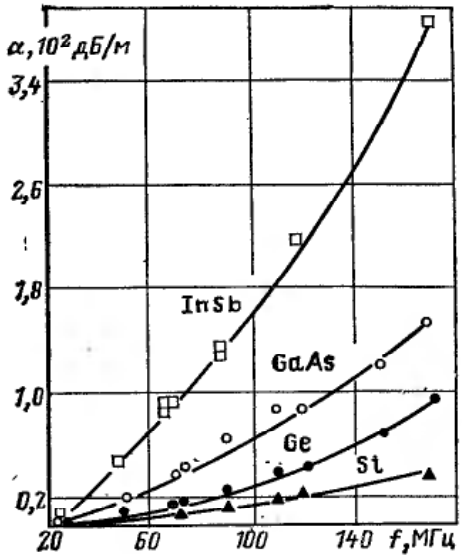


Рис. 7.50. Частотная зависимость поглощения в кремнии, германии, арсениде галлия, антимониде индия при 300 К L_{110}-волны. Концентрация примесей в Si и Ge: 10^{14} см$^{-3}$ As; в GaAs: $3 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ Te, в InSb: $2 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$ Te [160]

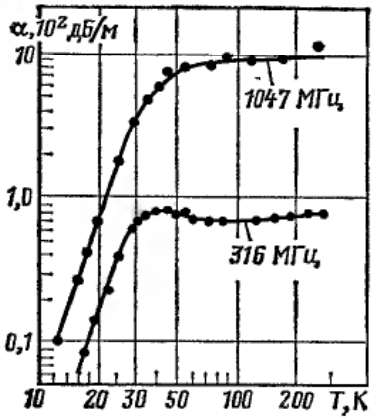


Рис. 7.51. Поглощение поверхностной волны на У-срезе кварца на разной частоте (волны распространяются в направлении [100]) [333]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Красильников В. А., Крылов В. В.** Введение в физическую акустику. М.: Наука. 1985.

2. **Eder F. X.**//Mod. Messmethoden Phys. 1960. Bd 1; **Petrallia S.**//Nouvo cimento Supp. 1952. Vol. 9. P. 1—12.

3. **Blythe A. R.**//Acoustica. 1965—1966. Vol. 16. P. 118—121.

4. **Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с нем./Под ред. В. С. Григорьева и Л. Д. Розенберга. М.: Изд-во иностр. лит. 1956.

5. **Kneser H. O.**//Ergeb. Exakt. Naturwiss. 1949. Bd 22. S. 121—127; **Nomoto O.** Ultrasonic waves. Tokyo. 1940; **Petrallia S.**//Nuovo cimento. 1951. Vol. 9. P. 1—8.

6. **Hardy H. C., Telfair D., Pielemeier W. H.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1942. Vol. 14. P. 226—232; **Pielemeier W. H., Hardy H. C.**//Ibid. 1941. Vol. 13. P. 80—84.

7. **Penman H. L.**//Proc. Phys. Soc. 1935. Vol. 47. P. 543—548.

8. **Quigley Th. H.**//Phys. Rev. 1946. Vol. 67. P. 298—302.

9. **Sherratt G. G., Griffiths E.**//Proc. Roy. Soc. 1934. Ser. A. Vol. 147. P. 292—297.

10. **Overbeck C. J., Kendall H.C.** //J. Acoust. Soc. Amer. 1941. Vol. 13. P. 26—31.

11. **Бачинский А. И., Путилов В. В., Суворов Н. П.** Справочник по физике. М.: Учпедгиз. 1951.

12. **Beyer R. T.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1951. Vol. 23. P. 176—181.

13. **Hodge A. H.**//J. Chem. Phys. 1937. Vol. 5. P. 974—977.

14. **Воларович М. П., Балашова Д. Б.**//Применение ультраакустики для исследования веществ. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 13. С. 63—68.

15. **Henderson M. C., Peselnick L.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1957. Vol. 29. P. 1074—1078.

16. **Meyer E., Sessler G.**//Z. Phys. 1957. Bd. 149. S. 15—20.

17. **Itterbeek A., Mariens P.**//Physica. 1937. Vol. 4. P. 609—615.

18. **Keller H. H.**//Z. Phys. 1940. Bd 41. S. 386—392.

19. **Вайтонис В. В., Яковлев В. Ф.**//Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 296—301.

20. **Itterbeek A., Mariens P.**//Physica. 1938. Vol. 5. P. 1533—1537; Vol. 7. P. 938—942, 909—913, 125—127; **Itterbeek A., Thys L.**//Physica. 1938. Vol. 5. P. 889—892, 298—302, 640—642.

21. **Красиушкин П. Е.**//Докл. АН СССР. 1940. Т. **27.** С. 214—217; Phys. Rev. 1944. Vol. 65. P. 190—193.

22. **Медников Е. П.** Акустическая коагуляция и осаждение аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР. 1963.

23. **Evans E. J., Bazley E. N.**//Acoustica. 1956. Vol. 6. P. 238—241; **Pohlmenn W.**//Proc. 3th Intern. Congr. Comm. Acoustics. Stuttgart. 1959. Vol. 1. P. 532—537.

24. **Sivian L. J.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1947. Vol. 19. P. 914—919.

25. **Liepmann H. W.**//Helv. Acta. 1938. Bd 11. S. 381—384; 1939; Bd 12. S. 421—425.

26. **Gupill E. W., Hoyt C. K., Robinson D. K.**//Canad. J. Phys. 1955. Vol. 33. P. 397—402.

27. **Beyer R. T.**//J. Chem. Phys. 1951. Vol. 19. P. 788—793.

28. **Pitt A., Jackson W. J.**//Canad. J. Phys. 1935. Vol. 12. P. 686—690.

29. **Itterbeek A., Forrez G., Teirlinck M.**//Physica. 1957. Vol. 23. P. 905—908.

30. **Findley J. C., Pitt A., Grayson S. H. e. a.**//Phys. Rev. 1938. Vol. 54. P. 506—508; 1939. Vol. 56. P. 122—125; **Chase C. E.**//Proc. Roy. Soc. 1953. Vol. A220. P. 116—120.

31. **Pellam J. R., Squire C. F.**//Phys. Rev. 1947. Vol. 72. P. 1245—1249; 1947. Vol. 71. P. 477—481.

32. **Пешков В. П.**//Докл. АН СССР. 1944. Т. 45. С. 385—388; **Лившиц Е. М., Пешков В. П.** Там же. 1945. Т. 47. С. 117—121.

33. **Михайлов И. Г.** Распространение ультразвуковых волн в жидкостях. М.: Гостехиздат. 1949.

34. **Galt J. K.**//J. Chem. Phys. 1948. Vol. 16. P. 505—509.

35. **Noury J., Lacam A.**//J. Phys. Rad. 1954. Vol. 15. P. 301—304.

36. **Landolt-Bornstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Tecnik. Neue serie. Gruppe II. Bd 5. Molecularakustik. W. Schaffs. Heidelberg: Springer-Verlag. 1967.

37. **Parthasarathy S.**//Proc. Ind. Acad. Sci. 1935. Vol. A2. P. 497—500; Vol. A3. P. 285—287, 482—485, 519—520, 544—546; 1936. Vol. A4. P. 59—62, 213—217; Current Sci. 1937. Vol. 6. P. 213—215.

38. **Schaffs W.**//Z. Phys. 1939. Bd 114. S. 110—115; Z. Phys Chem. 1944. Bd 194. S. 28—32; Z. Naturforsch. 1948. Bd 3. S. 396—401; Z. Phys. Chem. 1951. Bd 196. S. 397—402.

39. **Freyer E., Hubburd J. C., Andrews D.**//J. Amer. Soc. 1929. Vol. 51. P. 759—767.

40. **Schaffs W., Nutsch-Kuhnkles R.**//Acoustica. 1965—1966. Vol. 10. P. 66—69.

41. **Lagemann R. T., Millan D. R., Woolf W. E.**//J. Chem. Phys. 1949. Vol. 17. P. 369—373.

42. **Willard G. W.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1947. Vol. 19. P. 438—443.

43. **Greenspan M., Tschiegg C.**//Ibid. 1959. Vol. 31. P. 75—80.

44. **Zeifen N.**//Z. Phys. 1938. Bd 108. S. 681—687.

45. **Lagemann R. T., McMillan D. R., Woosley M.**// J. Chem. Phys. 1948. Vol. 16. P. 247—249.

46. **Baccaredda M., Giacomini A.**//Ricerca Sci. 1964. Vol. 16. P. 611—613; Att. Acad. Naz. Lincei. 1946. Vol. 1, P. 401—405.

47. **Цветков В., Маринин В.**//Докл. АН СССР. 1949. Т. 68. С. 49—52.

48. **Шутилов В. А.** Основы физики ультразвука. Л.: Изд-во ЛГУ. 1980.

49. **Seifen N.**//Z. Phys. 1938. Bd 108. S. 681—686.

50. **Weissler A.**//J. Chem. Soc. Amer. 1948. Vol. 70. P. 1634—1639.

51. **Kuhnkles R., Schaffs W.**//Acoustica. 1963. Vol. 13. P. 407—411.

52. **Pancholy M., Paude A., Parthasarathy S.**//J. Sci. Ind Res. 1944. Vol. 3. P. 5—10, 111—114, 159—162, 263—264, 354—357.

53. **Бражников Н. И.** Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества. Ультразвуковые методы/Под ред. Н. Н. Шумиловского. М.—Л.: Энергия. 1965.

54. **Wilson W. D.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1951. Vol. 23. P. 1067—1072; **Секоян С. С.**//Измерительная техника. 1963. № 4. С. 51—55; **Del Grosso V. A., Mader C. W.**// J. Acoust. Soc. Amer. 1972. Vol. 52. P. 1442—1446. **Илгунас В., Яронис Э., Сукацкас В.** Ультразвуковые интерферометры. Вильнюс: Мокслис. 1983.

55. **Seemann H. J., Klein F. K.**//Z. Angew. Phys. 1965. Bd 19. S. 368—372.

56. **Вьюгов П. Н., Гуменюк В. С.**//Укр. физ. журн. 1966. Т. 11. С. 440—445.

57. **Bockris O. M., Richards N. E.**//Proc. Roy. Soc. 1957. Vol. A241. P. 44—51.

58. **Ходов З. Л.**//Физ. металлов и металловедение. 1960. Т. 10. С. 722—725.

59. **Веббер Дж., Стефенс Р.** Физическая акустика/ Под ред. У. Мэзона; Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова, В. А. Шутилова. М.: Мир. 1970. Т. IV. Ч. Б.

60. **Kleppa O. J.**//J. Chem. Phys. 1950. Vol. 18. P. 1331—1335.

61. **Гитис М. Б., Михайлов И. Г.**//Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 145—159.

62. **Пронин Л. А., Филиппов С. И.**//Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. 1963. Т. 5. С. 10—14.

63. **Илгунас В. И., Яронис Э. П.**//Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 145—149.

64. **Abowitz G., Gordon R. B.**//J. Cmeh. Phys. 1962. Vol. 37. P. 125—129.

65. **Barmatz M., Rudnick I.**//Phys. Rew. 1968. Vol. 170. P. 224—228.

66. **Трелин Ю. С., Васильев И. В.**//Применение ультраакустики к исследованию вещества. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 13. С. 3—10.

67. **Gordon R. B.**//Acta Met. 1959. Vol. 7. P. 1—8.

68. **Полоцкий И. Г., Ходов З. Л.**//Вопросы физики металлов. 1955. Т. 6. С. 70—74.

69. **Полоцкий И. Г., Ходов З. Л.**//Акуст. журн. 1958. Т. 4. С. 184—187.

70. **Hubbard J. S., Loomis A. L.**//Phyl. Mag. 1928. Vol. 5. P. 1177—1184.

71. **Kleppa O. Y.** J. Chem. Phys. 1949. Vol. 17. P. 668—672.

72. **Jarzinski J.**//Proc. Phys. Soc. 1963. Vol. 81. P. 745—749.

73. **Пронин Л. А., Филиппов С. И.**//Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. 1963. Т. 11. С. 11—17; **Казаков Н. Б., Пронин Л. А., Филиппов С. И.**//Там же. 1964. Т. 12. С. 11—16.

74. **Plass K. G.**//Acoustica. 1963. Vol. 13. P. 240—244; Akust. Beih. 1963. Bd 13. S. 240—246.

75. **Hunter J. L., Hovan K. S.**//J. Chem.Phys. 1964. Vol. 41. P. 4013—4016; J. Acoust. Soc. Amer. 1964. Vol. 36. P. 1040—1043; **Hunter J. L., Welch T. J., Montrose C. J.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1963. Vol. 35. P. 1568—1572.

76. **Отпущенников Н. Ф., Сысоев И. В.**//Доклады I Всесоюзного симпозиума по акустооптической спектроскопии. Ташкент: ФАН, 1976. С. 109—113.

77. **Wilson W., Bradlay D.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1964. Vol. 36. P. 333—338.

78. **Hawley S., Allegra J., Holton Y.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1970. Vol. 47. P. 258—264.

79. **Авгибаев Б., Икрамов Ш. Х., Шин И. Б.**//Доклады I Всесоюзного симпозиума по акустооптической спектроскопии. Ташкент: ФАН. 1976. С. 148—151.

80. **Smith A. H., Lawson A. W.**//J. Chem. Phys. 1954. Vol. 22. P. 351—356.

81. **Hunter J. L., Dardy H. D., Bucaro J. A.**//Preprint ND26. Congress Intern. Acoust. Liege. 1965. P. 165—167.

82. **Pyro J. F., Edmonds P. D.**//Mol. Cryst. Lig. Cryst. 1974. Vol. 25. P. 175—177.

83. **Wetsel G. C., Speer R. S., Lowry B. A. e. a.**//J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. P. 1495—1498.

84. **Miyano K., Ketterson J. B.** Phys. Rev. Lett. 1973. Vol. 34. P. 1047—1052.

85. **Miyano K., Ketterson J. B.**//Phys. Rev. 1975. Vol. A12. P. 615—619.

86. **Walsh J. M., Rice M. H.**//J. Cmeh. Phys. 1957. Vol. 26. P. 815—819.

87. **Зарембо Л. К., Красильников В. А.** Введение в нелинейную акустику. М.: Физматгиз. 1966; **Гунь-Сюфэнь, Зарембо Л. К., Красильников В. А.**//Акуст. журн. 1963. Т. 9. С. 382.

88. **Beyer R. T., Coppens A. B.**//Proc. 5th Intern. Comm. Acoust. Congr. Liege. 1965. P. 515—516.
89. **Swamy K. M., Narayan K. L., Swamy P. S.**//Acoustica. 1975. Vol. 32. P. 339—342.
90. **Шкловская-Корди В. В.**//Акуст. журн. 1963. Т. 9. С. 107—110.
91. **Михайлов И. Г. Шутилов В. А.**//Там же 1960. Т. 6. С.340—343.
92. **Emery J., Kammoun C.**//C. R. Acad. Sci. (Paris). 1976. Vol. 283. P. 131—134.
93. **Adler L., Hiedemann E. A.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1962. Vol. 34. P. 410—415.
94. **Зверев В. А., Калачев А. И.**//Акуст. журн. 1958. Т. 4. С. 321—325.
95. **Swamy K. M., Narayan K. L., Swamy P. S.**//Acoustica. 1976. Vol. 34. P. 48—51.
96. **Thakur K. P.**//Ibid. 1976. Vol. 39. P. 270—272.
97. **Hagelberg M. P., Holton G., Kao S.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1967. Vol. 41. P. 564—568.
98. **Markham J., Beyer R., Lindsay R. B.**//Rev. Mod. Phys. 1951. Vol. 23. P. 353—359.
99. **Thorp W. H.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1967. Vol. 42. P. 272—275.
100. **Lacam A., Nairy J.**//J. Phys. Rad. 1953. Vol. 14. P. 272—275.
101. **Heaseall L., Lamb J.**//Proc. Phys. Soc. 1956. Vol. 69. P. 869—873.
102. **Mallikarjuna Rao S. P., Suryanarayana M.**//Ind. J. Pure and Appl. Phys. 1973. Vol. 11. P. 824—829.
103. **Pellam J. R., Galt J. K.**//J. Chem. Phys. 1946. Vol. 14. P. 608—613.
104. **Бердыев А. А.**//Изв. АН Туркм. ССР. Сер. физ.-техн. 1965. № 3. С. 16—21; **Бердыев А. А., Лежнев Н. Б.**// Акуст. журн. 1966. Т. 12. С. 247—250.
105. **Парпиев К., Хабибулаев П. К., Халиулин М. Г.**// Там же 1969. Т. 15. С. 466—468.
106. **Hunter J. L.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1941. Vol. 13. P. 36—41.
107. **Sette D.**//J. Chem. Phys. 1951. Vol. 19. P. 1337—1341.
108. **Бажулин П. А.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1938. Т. 8. С. 457—460.
109. **Lamb J., Pinkerton M. M.**//Proc. Roy. Soc. 1949. Vol. 199. P. 114—120.
110. **Nomoto O., Kishimoto T., Ikeda T.**//Bull. Kobayaci Inst. Phys. Res. 1952. Vol. 2. P. 72—78.
111. **Pinkerton M. M.**//Proc. Phys. Soc. 1949. Vol. 62. P. 129—133.
112. **Lawley L. E., Reed R. D.**//Acoustica. 1955. Vol. 5. P. 316—320.
113. **Matthias B. T.**//Nature. 1948. Vol. 161. P. 325.
114. **Pancholy M., Parthasarathy S., Chapgar A. F.**// Nuovo Cimento. 1958. Vol 10. P. 111—116.
115. **Andreae J. H., Lamb J.**//Proc. Phys. Soc. 1951. Vol. B64. P. 1021—1026; **Rapuano R. A.**//Phys. Rev. 1947. Vol. (2)72. P. 78—83.
116. **Давидович Л. А., Иванов А. А., Махкамов С. И. и др.**//Акуст. журн. 1973. Т. 19. С. 26—31.
117. **Шорошев Ю. Г., Лаишина Л. В., Шахпоронов М. И.**//Докл. АН СССР. 1967. Т. 173. С. 70—72.
118. **Махкамов С. И., Хабибулаев П. К., Халиулин М. Г.**//Акуст. журн. 1974. Т. 20. С. 643—644.
119. **Chase C. E.**//Proc. Roy. Soc. 1953. Vol. A220. P. 116—121; Phys. Fluids. 1958. Vol. 1. P. 193—197.
120. **Fox F. E., Rock G. D.**//Phys. Rev. 1946. Vol. 2. P. 68—73; **Smith M. C., Beyer R. T.**//1948. Vol. 27. P. 654—658; **Pinkerton J. M. M.**//Nature. 1947. Vol. 1960. P. 128.
121. **Кошкин Н. И.**//Применение ультраакустики к исследованию вещества. М.: Изд. МОПИ. 1955. Вып. 1. С. 101—146.
122. **Fox F. E., Wallace W.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1954. Vol. 26. P. 994—1001.
123. **Towle D. M., Lindsay R. B.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1955. Vol. 27. P. 530—534.
124. **Зарембо Л. К., Красильников В. А., Шкловская-Корди В. В.**//Докл. АН СССР. 1956. Т. 109. С. 731—734.
125. **Зарембо Л. К.** Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1958.
126. **Narasimhan V., Beyer R. T.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1956. Vol. 28. P. 1233—1234.
127. **Наугольных К. А., Романенко Е. В.**//Акуст. журн. 1958. Т. 4. С. 200—204.
128. **Birch F.**//Earth Today/Ed. T. F. Gaskell, A. H. Cook. N.-Y. 1961. P. 295.
129. **Salalanu C.**//C. R. Acad. Sci. 1961. Vol. 252. S. 3021—3025.
130. **Overton W. C.**//J. Chem. Phys. 1950. Vol. 18. P. 113—118.
131. **Winder D. R., Smith C. S.**//Phys. Chem. Solids. 1958. Vol. 4. P. 128—133.
132. **Беранек Л.** Акустические измерения: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1952.
133. **Белянин В. А., Новиков И. И., Проскурии В. Б.**// Тр. IX Всесоюзной акустической конференции. Вып. 2. С. 107—110.
134. **Отпущенников Н. Ф.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1952. Т. 22. С. 782—786; **Кузьмеико В. А.**//Применение ультразвуковых колебаний для исследования свойств, контроля качества и обработки металлов и сплавов. Киев: Изд-во АН УССР. 1960. С. 79—85.
135. **Морозов А. И., Проклов В. В., Станковский Б. А.** Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. М.: Радио и связь. 1981.
136. **Красильников В. А.** Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. М.: Физматгиз. 1960.
137. **Иванов В. Б.** Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛЭТИ, 1971.
138. **Auberger M., Reinehart J. S.**//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 219—221.
139. **Bacher K.**//Verh. Deutsch. Phys. Ges. 1939. Bd. 3. S. 68—72; Z. Erdol und Kohle. 1949. Bd 2. S. 125—127; **Воларович М. П., Баюк Е. И.**//Применение ультраакустики к исследованию вещества. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 11.
140. **Мартынов Е. Г., Матвеев А. К.**//Там же. 1960. Вып. 10. С. 147—152.
141. **Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.** Ультразвуковые методы в физике твердого тела: Пер. с англ./Под ред. И. Г. Михайлова, В. В. Леманова. М.: Мир. 1972. С. 307.
142. **Дричко И. Л., Илисовский Ю. В., Гальперин Ю. М.**//Физика твердого тела. 1969. Т. 11. С. 2463—2466.
143. **McSkimin H. J., Andreatch P. Jr.**//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 3312—3315.
144. **Меркулов Л. Г.**//Акуст. журн. 1959. Т. 5. С. 432—437.
145. **Papadakis E. P.**//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 2168—2172.
146. **Chatak S. K., Sinha S. K.**//Indian J. Phys. 1974. Vol. 48. P. 66—74.
147. **Meitzler A. H.**//Ultrasonic Transducer Materials/ Ed. O. E. Mattiat. N.—Y.: Plenum Press. 1971.
148. **Kor K. S., Tandon U. S., Mishra P. K.**//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 2396—2399.
149. **Vallin J., Marklund K., Sikstrom J. O.**//Arkiv for Pysik. 1966. Bd 33. S. 345—351.
150. **Dixon R. W.**//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 3634—3639.
151. **Ушида Н. С. Ниидзеки Л. Н.**//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1973. Т. 61. С. 21—32.

152. **Lee B. H.**//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 2984—2988.

153. **Леманов В. В., Авдонин В. Я., Павленко А. В.**// Физика твердого тела. 1969. Т. 11. С. 2635—2639.

154. **Beattic A. G., Samara G. A.**//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 2376—2378.

155. **Физическая** акустика/Под ред. У. Мэзона, Р. Терстона: Пер. с англ./Под ред. И. Л. Фабелинского. М.: Мир. 1973. Т. 6.

156. **Байрамов Б. Х., Захарченя Б. П., Писарев Р. В. и др.**//Физика твердого тела. 1971. Т. 13. С. 3366—3370.

157. **Melngailis J., Vetelino J. F., Jhunjhunwala A. e. a.**// Appl. Phys. Lett. 1978. Vol. 32. P. 203—207.

158. **Север Г. А., Баранский К. Н.**//Изв. АН СССР. Сер. физ., 1971. Т. 35. С. 935—939.

159. **Анисимкин В. И., Земляницын М. А., Морозов А. И.**//Физика твердого тела. 1975. Т. 17. С. 1513—1517.

160. **Красильников О. М., Векилов Ю. Х., Кадышевич А. Е.**//Там же. 1969. Т. 11. С. 1200—1207.

161. **Alton W. J,. Barlow A. J.**//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 3023—3027.

162. **Spencer E. G., Denton R. T.**//Ibid. 1963. Vol. 34. P. 3059—3064; **Belt R. F.**//Laser Focus. 1970. Vol. 6. P. 44—46.

163. **Bateman T. B.**//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 2194—2201.

164. **Clark A. E., Strakna R. E.**//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 1172—1177.

165. **Landolt-Bornstein.** Zahlenw erte und Funktinen aus Naturwissenschaften und Technik. Neue Serie, Bd 7. Kristallstruterdaten anorganischer Verbindungen. Berlin. Springer Verlag. 1971.

166. **Беляев Л. М., Витовский Б. В., Добржанский Г. Ф.**//Рост кристаллов. М.: Изд-во АН СССР. 1957. Т. 1. С. 249—257; **Тырбу И. А., Ульяиов В. Л. Ботаки А. А.**//Физика твердого тела. 1973. Т. 15. С. 3389—3394.

167. **Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И. и др.** Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука. 1965.

168. **Pratt R. G., Simpson G., Grossley W. A.**//Electron. Lett. 1972. Vol. 8. P. 127.

169. **Cottlieb M., Isaaks T. J., Feichtner J. D. e. a.**// J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 5145—5150; **Isaaks T. J., Cottlieb M., Daniel M. e. a.**//J. Electr. Mat. 1975. Vol. 4. P. 67—73.

170. **Yano T., Nabeta J., Watánabe A.**//Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 18. P. 570—571.

171. **Warner A. W., Pinkow D. A.**//J. Acoust. Soc. Am. 1970. Vol. 47 P. 791—797.

172. **Bateman T. B.**//Ibid. 1962. Vol. 33. P. 3309—3317.

173. **Cline C. F., Dunegan H. L., Henderson G. W.**// Ibid. 1967. Vol. 38. P. 1944—1952.

174. **McFee J. H.**//Ibid. 1963. Vol. 34. P. 1548—1557; **Hutson A. R.**//Phys. Rev. Lett. 1960. Vol. 4. P. 505—507.

175. **Федотов И. И., Кузнецов В. Н.**//Применение ультраакустики к исследованию веществ. М.: Изд. МОПИ. 1961. Вып. 14. С. 269—275.

176. **Александров К. С., Анистратов А. Т., Рез И. С. и др.**//Физика твердого тела. 1977. Т. 19. С. 1863—1868.

177. **Сильвестрова И. М., Барта Ч., Добржанский Г. Ф. и др.**//Кристаллография. 1975. Т. 20. С. 1062—1068.

178. **Pinnow D. A., Van Uitert L. G., Warner A. W. e. a.**//Appl. Phys. Lett. 1969. Vol. 15. P. 83—85.

179. **Бадиков В. В., Богданов С. В., Годовиков А. А. и др.**//Акуст. журн. 1971. Т. 17. С. 300—305.

180. **Можайский В. Н.**//Приборы и техн. эксперим. 1974. Т. 2. С. 200—206.

181. **Dieulesaint E., Royer D.** Ondes elastiques dans les solids. Application au traitement du signal/Ed. Masson, Paris. 1974.

182. **Coquin G. A., Pinnow D. A., Warmer A. W.**//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 2163—2168.

183. **Lange J. N.**//Phys. Rev. 1968. Vol. 176. P. 1030—1035.

184. **Kleszczewski Z.**//Archiwum Akustiyki. 1978. Vol 13. P. 235—241.

185. **Ohmachi C., Uchida N.**//J. Appl. Phys. 1970. Vol 41. P. 2307—2313.

186. **Dutoit M.**//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics 1973. Vol. SU-20. P. 279—288.

187. **Сосов Ю. М., Юшин Н. К., Кудзин А. Ю.**//Письма ЖТФ. 1977. Т. 3. С. 475—477.

188. **Писаревский Ю. В., Пополитов В. И., Сильвестрова И. М. и др.**//Материалы XII Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Саратов. 1983. Ч. II. С. 363—364.

189. **Бондаренко В. С., Гавриляченко В. Г., Чкалова В. В. и др.**//Науч. тр. вузов ЛитССР. Ультразвук. 1977. Т. 9. С 105—111.

190. **Ohmachi C., Uchida N.**//J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. P. 3583—3589.

191. **Луданов А. Г., Фотченков А. А., Яковлев Л. А.**// Акуст. журн. 1976. Т. 22. С. 612—617.

192. **Зобнин О. П., Яковлев Л. А.**//Там же. 1976. Т. 22. С. 234—239.

193. **Weidner D.**//Geophys. Rev. Lett. 1975. Vol. 2. P. 189—191.

194. **Заграй Н. П., Максимов В. Н.**//Прикладная акустика, Таганрог: Изд. ТРТИ. 1975. Вып. 1. С. 187—192.

195. **Аникеев Д. И., Заремба Л. К., Карпачев С. Н.**// Физика твердого тела. 1982. Т. 24. С. 2938—2941.

196. **Левитес А. Ф., Минаева К. А., Струков Б. А. и др.**//Приборы и техн. эксперим. 1974. № 5. С. 187—194.

197. **Sapriel J.**//Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 19. P. 533—535.

198. **Spenser E. G., Lenzo P. V.**//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 423—428.

199. **Smith R. T., Welsh F. S.**//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. J. 6—15.

200. **Чкалова В. В., Бондаренко В. С., Клюев В. П. и др.**//Электронная техника. Сер. 14. 1968. Вып. 4. С. 158—164.

201. **Кудзин В. В.**// Физика твердого тела. 1971. Т. 13. С. 651—656.

202. **Лежнев Н. Б., Карабаш В. И.**//Материалы XI Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Душанбе. 1981. Ч. II. С. 79—80.

203. **Бараиский К. Н., Бердыев А. А., Писаревский Ю. В. и др.**//Изв. АН Туркм. ССР. Сер. физ.-техн. 1975. № 1. С. 37—44.

204. **Carleton H. R., Soref R. A.**//Appl. Phys. Lett. 1966. Vol. 9. P. 109—112.

205. **Ultrasonic** Transduser Materials/Ed. O.E. Mattiat. N. Y.: Plenum Press. 1971.

206. **Родриг Г. П.**//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1965. Т. 53. С 1613—1623.

207. **Мустель Е. Р., Парыгин В. Н.**//Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.

208. **Дьяков А. М., Илисавский Ю. В., Фарбштейи И. И. и др.**//Письма ЖТФ. 1977. Т. 3. С. 564—566.

209. **Bajak I. L.**//2 pracovha konferencia cs. fyzikow, Bratislava. 1971. S. 184—185.

210. **Warner A. W., Coquin G. A., Fink J. L.**//Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 4353—4358.

211. **Моисеева Н. А., Сильвестрова И. М., Писаревский Ю. В.** Акустические свойства кристаллов. Бифталат калия. Препринт ИКАН. М. 1977.

212. **Беликова Г. С., Беляев Л. М., Головей М. И. и др.**//Кристаллография. 1974. Т. 19. С. 566—573; **Беликова Г. С., Писаревский Ю. В., Сильвестрова И. М.**//Физ. и хим. тв. тела. 1973. Т. 3. С. 18—24.

213. **Tokuro I., Itsuro I.**//Japan J. Appl. Phys. 1976. Vol. 15. P. 1451—1457.
214. **Gottlieb M.**//Laser Focus. 1972. Vol. 8. P. 24—28.
215. **Duderov N. G., Demianets L. N., Lobachev A. M. e. a.**//J. Crystall Growth. 1978. Vol. 44. P. 483—489.
216. **Andrews R. A.**//IEEE J. Quant. Electron. 1970. Vol. QE. P. 68—77.
217. **Epstein D. J., Herrick W. H., Turek R. F.**//Solid State Commun. 1970. Vol. 8. P. 1491—1497.
218. **Busch M., Toledand I. C., Torres J.**//Opt. Commun. 1974. Vol. 10. P. 243—249.
219. **Hochli U. T.**//Phys. Rev. 1972. Vol. B6. P. 1814—1821.
220. **Roland G. W.**//Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 21. P. 52—54.
221. **Кунигелис В. Ф., Самулионис В. И.**//Науч. тр. вузов ЛитССР. Ультразвук. 1972. Т. 14. С. 11—16.
222. **Уайт Д. Л.**//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1970. Т. 58. С. 68—75.
223. **Яковкин И. Б., Петров Д. В.** Дифракция света на акустических поверхностных волнах. Новосибирск: Наука. 1979.
224. **Pennury O., Lakin K. M.** Proc. Ultrasonic Simp. Los. Angel. 1975. P. 478—479.
225. **Сибаяма К., Яманури К., Сато Х. и др.**//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 27—29.
226. **Левин М. Д., Лобанова Г. А., Пащин Н. С. и др.**//Акуст. журн. 1975. Т. 21. С. 68—71.
227. **Campbell J. J.**//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 2797—2802; **Nutson A. R., White D. L.**//Ibid. 1962. Vol. 33. P. 40—49; **Szabo E. L., Slobodnik A. J.**//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1973. Vol. SU-20. P. 240—252.
228. **Microwave** Acoustics Handbook/Ed. A. Slobodnik, E. D. Conway, N. Y.: Office of Aerospace Research United State Air Force. 1970. Vol. 1.
229. **O'Connell R. M., Carr P. H.**//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1977. Vol. SU-24. P. 376—389.
230. **Scott B. A., Ingebrigsten K. A., Tseng C. C.**//Nat. Res. Bull. 1970. Vol. 5. P. 1045—1051.
231. **Жаффе Н., Берлинкур Д. А.**//Тр Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1965. Т. 53. С. 1552—1567; **Namatsu S., Doi K., Takahasti M.**//Japan J. Appl. Phys. 1972. Vol. 11. P. 816—821; **Gupta S. N., Vatelino J. F., Lipson V. B. e. a.**//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 858—863.
232. **Слободник А. Д.**//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 10—26.
233. **Каринский С. С.** Устройства обработки сигналов на ультразвуковых поверхностных волнах. М.: Сов. радио. 1975.
234. **Яковкин И. Б., Пащин Н. С.**//Тезисы докладов VIII Всесоюзн. конф. по квантовой акустике и акустоэлектронике. Казань. 1974. С. 38—39.
235. **Ingebrigsten K. A., Tonning A.**//Appl. Phys. Lett. 1966. Vol. 9. P. 16—18.
236. **Колдрен Л. А., Шоу Х. Дж.**//Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 30—44.
237. **Coquin G. A., Tiersten H. F.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1967. Vol. 41. P. 921—939.
238. **Залесский В. В., Мельцер Я. Е., Стремовский Э. В.**//Приборы и техн. эксперим. 1976, № 6. С. 107—112.
239. **Kraut E. A., Tittman B. R., Graham L. J e. a.**// Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 17. P. 271—278; **Meingailis J., Vetelino J. F., Jhunjhunwala A. e. a.**Ibid. 1978. Vol. 32. P. 203—205.
240. **Slobodnik A. J., Conway E. D.**//Electron. Lett. 1970. Vol. 6. P. 171—173; **Slobodnic A. J., Szabo T. L.**// Electron. Lett. 1971. Vol. 7. P. 257—259.
241. **Фарнел Дж.**//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона. М.: Мир. 1973. Т. 6. С. 139—158.
242. **Simpson G.**//Electron. Lett. 1973. Vol. 9. P. 21—24.
243. **Bateman T. B., McSkimin H. J., Whelar K.**//J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30. P. 544—551; **Hutson A. R.**// Phys. Rev. Lett. 1960. Vol. 4. P. 505—507; **Кайно Г. С.**// Тр. Ин-та инж. электротехн. и радиоэлектрон. 1976. Т. 64. С. 188—199.
244. **Isaaks T. J., Weinert R. W.**//J. Electron. Mat. 1976. Vol. 5. P. 13—18.
245. **Molokhia N. H., Issa M. A.**//Pramana. 1978. Vol. 11. P. 289—295.
246. **Dieulesaint E., Royer D.**//Piezoelectricite. 1976. Vol. 54. P. 180—185.
247. **Schulz M. B., Holland M. G.**//Component performance and systems applications of SAW device. Scotland. 1973. P. 1—10.
248. **Rouvaen J. M., Bridox E., Waxin G. e. a.**//J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49(4). P. 2306—2312.
249. **Seavy M. H.**//Solid State Comm. 1972. Vol. 10. P. 219—223.
250. **Бережнов В. В., Преображенский В. Л., Экономов И. А. и др.**//Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. С. 376—379.
251. **Campbell J. J., Jones W. R.**//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1968. Vol. SU—15. P. 209—220.
252. **Кнопов Л.**//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. И. Л. Фабелинского. М.: Мир. 1968. Т. 3. Ч. Б.
253. **Birch F., Bancroft D.**//Bull. Seismol. Soc. Amer. 1938. Vol. 28. P. 243—250.
254. **Bruckshaw J., Mahanta P.**//Petroleum (Lond.). 1954. Vol. 17. P. 14—19.
255. **Knopoff L., Porter L. D.**//J. Geophys. Res. 1963. Vol. 68. P. 6317—6325.
256. **Peselnick L., Zietz I.**//Geophys. 1959. Vol. 24. P. 285—291.
257. **Born W. T.**//Ibid. 1941. Vol. 6. P. 132—139.
258. **Mason W. P., McSkimin H. H.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1947. Vol. 19. P. 466—475.
259. **Zemanek J. Jr., Rudnick I.**//Ibid. 1961. Vol. 33. P. 1283—1288.
260. **Lucke K.**//J. Appl. Phys. 1956. Vol. 27. P. 1433—1438.
261. **Auberger M., Rinehart J. S.**//Ibid. 1961. Vol. 32. P. 219—225.
262. **Roth W.**//Ibid. 1948. Vol. 19. P. 901—908.
263. **Lindsay G.**//Phys. Rev. 1914. Vol. 3. P. 397—405.
264. **Wedel R. L., Walther H.**//Phys. 1935, Vol. 6. P. 141—148.
265. **Gemant A., Jackson W.**//Phyl. Mag. 1937. Vol. 23. P. 960—971.
266. **Kimball A. L., Lovell D. E.**//Phys. Rev. 1927. Vol. 30. P. 948—956.
267. **Papadakis E. P.**//J. Acoust. Soc. Amer. 1965. Vol. 37. P. 711—718.
268. **West F. G.**//J. Appl. Phys. 1958, Vol. 29. P. 480—485.
269. **Blair D. G., Buckingham M. I., Edwards C. e. a.**// Proc. 2nd Marcel Grossmann Conf. General Relativity. Triest. 1980. P. 185—187.
270. **McGuigan D. G., Lam C. C., Douglass D. H. e. a.**//J. Low Temp. Phys. 1978. Vol. 30. P. 621—626.
271. **Брагинский В. Б., Митрофанов В. П., Панов В. И.** Системы с малой диссипацией. М.: Наука. 1981.
272. **Гранато А., Люкке К.**//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова и Л. Д. Розенберга. М.: Мир. 1969. Т. 4. Ч. А. С. 261—321.
273. **Пападакис Э.**//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова и В. А. Шутилова. 1970 М: Мир. Т. 4. Ч. Б. С. 317—381.
274. **Helme B. G., King P. J.**//Phys. Stat. Solids. 1978. Vol. 45. P. K33—K39.

275. **Hickernell F. S.**//IEEE Trans. Microwave Theory and Techn., 1969. Vol. MTT-17. P. 957—963.
276. **Landolt-Börnstein.** Zalenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik. Neue Series. Bd 3. Ferro- und Antiferroelectrische Substanzen. Berlin. 1969.
277. **Venturini E. L., Spencer E. G., Ballmann A. A.**// J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 1622—1628.
278. **Меркулов Л. Г., Коваленок Р. В., Коноводченко Е. В.**//Физика твердого тела, 1969. Т. 11. С. 2769—2774; 1971. Т. 13. С. 1171—1176; 1972. Т. 14. С. 340—344.
279. **Auld B. A.** Acoustic Fields and Waves in Solids. N. Y.: John Wiley. 1973.
280. **Holland M. G.**//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1968. Vol. SU-15. P. 18—31.
281. **Губанов А. И., Давыдов С. Ю.**//Физика твердого тела, 1972. Т. 14. С. 2187—2191.
282. **Oliver D. W., Slack G. A.**//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 1542—1547.
283. **Rehwald W.**//Ibid. 1973. Vol. 44. P. 3017—3021.
284. **Шлеман Е., Джозеф Р. И., Кохейн Т.**//Тр. Ин-та электротехн. и радиоэлектрон. 1965. Т. 53. С. 1685—1698.
285. **Беляев Л. М., Багдасаров Х. С., Сильвестрова И. М. и др.**//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. Т. 35. С. 941—945.
286. **Гришмановский А. П., Юшин Н. К., Богданов В. Л. и др.**//Физика твердого тела. 1971. Т. 13. С. 1833—1838.
287. **Абрамович А. А., Хромова Н. Н., Шутилов В. А.**// Акуст. журн. 1976. Т. 22. С. 278—283.
288. **Wilkinson C. D., Caddes D. E.**//J. Opt. Soc. Amer. 1966. Vol. 40. P. 498—504.
289. **Broussand G.** Optoelectronique/Ed. Masson. Paris. 1974.
290. **Меркулов Л. Г., Яковлев Л. А.**//Акуст. журн. 1959. Т. 5. С. 374—381.
291. **King P. J.**//J. Phys. 1970. Vol. 3. P. 500—506.
292. **Мастихин В. М., Богданов С. В., Дарвойд Т. И. и др.**//Оптико-механическая промышленность. 1977. № 8. С. 36—43.
293. **Семенов В. И., Сапожников В. К., Авдиенко К. И. и др.**//Физика твердого тела. 1976. Т. 18. С. 2805—2809.
294. **Smith A. B., Kedzie R. W., McManon D. H. e. a.**// J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 2687—2692.
295. **Василевская А. С., Сонин А. С., Рез И. С. и др.**// Изв. АН СССР. Сер. физ. 1967. Т. 31. С. 1159—1163.
296. **Ohmachi J., Uchida N.**//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 521—527.
297. **Мастихин В. М., Сапожников В. К., Сербуленко М. Г. и др.**//Автометрия, 1975. Т. 3. С. 31—38.
298. **Lewis I. T., Lehoczky A., Briscoe C. V.**//Phys. Rev. 1967. Vol. 161. P. 877—883.
299. **Hemphill R.**//Appl. Phys. Lett. 1966. Vol. 9. P. 35—37.
300. **Holovey M. I., Gurzan M. J., Olexeyk J. D. e. a.**// Kristall und Techn. 1973. Bd 8. S. 453—457.
301. **Есаян С. Х., Леманов В. В., Рез И. С. и др.**// Физика твердого тела. 1973. Т. 15. С. 907—912.
302. **Богданов С. В, Зубринов И. И., Шелопут Д. В.**// Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. Т. 35. С. 2013—2017.
303. **Dutoit H.**//IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics. 1973. Vol. SU-20. P. 279—291.
304. **Midford T. A., Wanuga S.**//J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 3362—3368.
305. **Fitzgerald T. M., Chick B. B., Truel R.**//Ibid. 1964. Vol. 35. P. 2647—2653.
306. **Григорьев М. А., Зюрюкин Ю. А., Наянов В. И. и др.**//Физика твердого тела. 1970. Т. 12. С. 3033—3038.
307. **Григорьев М. А., Зайцев Б. Д., Пылаева Г. И. и др.**//Там же, 1973. Т. 15. С. 1398—1402.
308. **Мэзон У.** Физическая акустика: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова, Л. Д. Розенберга. М.: Мир. 1969. Т. 4. Ч. А.
309. **Fitzgerald T. M., Silverman B. D.**//Phys. Rev. Lett. 1967. Vol. 25A. P. 245—246.
310. **Reinjes J., Schulz M. B.**//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 5254—5262.
311. **Smakula A.** Einkristalle, Wachtsum, Herstellung und Anwendung. Berlin. 1962.
312. **Леманов В. В.** Дис. ... д-ра физ-мат. наук. Л.: ЛФТИ им. А. Ф. Иоффе. 1973.
313. **Luthi B., Pollina R. J.**//Phys. Rev. 1968. Vol. 167. P. 482—489.
314. **Barret H. H.**//Ibid. 1969. Vol. 178. P. 743—748.
315. **Levy S., Truell R.**//Rev. Mod. Phys. 1953. Vol. 25. P. 140—152.
316. **Гончаров К. В., Клюев В. П., Лямов В. Е. и др.**// Тр. VI Всесоюзн. акустич. конф. М. 1968.
317. **Авдонин В. Я., Леманов В. В., Смирнов И. А. и др.**//Физика твердого тела. 1972. Т. 14. С. 877—883.
318. **Великов Ю. Х., Кадышевич А. Е., Красильников О. Е.**//Там же. 1971. Т. 13. С. 1310—1320.
319. **Dransfeld K.**//J.Phys. Colliq. Cl, Suppl. 2. 1967. Vol. 28. P. 157—162.
320. **Де-Клерк Дж.**//Физическая акустика/Под ред. У. Мэзона: Пер. с англ./Под ред. Л. Г. Меркулова, Л. Д. Розенберга. М.: Мир. 1969. Т. 4. Ч. А. С. 231—272.
321. **Григорьев М. А., Зюрюкин Ю. А., Наянов В. И. и др.**//Электронная техника. Сер. Контрольно-измерительная аппаратура. 1970. Вып. 1(19). С. 121—126.
322. **Иванов С. Н., Котелянский И. М., Медведев В. В. и др.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1976. Т. 70. С. 281—286.
323. **Bommel H.**//Phys. Rev. 1955. Vol. 100. P. 758—766.
324. **Самулионис В. И., Кунигелис В. Ф., Гаршка Э. П.**//Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 9. С. 459—461.
325. **Майщик Е. П., Струков Б. А., Синяков Е. В. и др.**//Физика твердого тела. 1977. Т. 19. С. 335—340.
326. **Богданов С. В., Балакирев М. К., Иваиов Е. В. и др.**//Материалы XII Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Саратов. 1983. Ч. I. С. 15—17.
327. **Абрамович А. Л., Шутилов В. А., Левицкая Т. Д. и др.**//Физика твердого тела. 1972. Т. 14. С. 2585—2590.
328. **Илисавский Ю. В, Стернин В. М.**//Материалы XII Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Саратов, 1983. Ч. II. С. 281—282.
329. **Антонов С. Н., Проклов В В., Миргородский В. И. и др.** Материалы XI Всесоюзн. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Душанбе. 1981. Ч. 1. С. 174—175.
330. **Keller O.**//Phys. Lett. 1972. Vol. 39A. P. 235—236; **Siebert F., Keller O., Wettling W.**//Phys. Stat. Sol. 1971. Vol. 4. P. 67—71.
331. **Farnell G. M.**//Wave Electronics. 1976. Vol. 2. P. 1—24.
332. **Carr P. H.**//IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1969. Vol. MTT-17, N 11. P. 458—471.
333. **Salzmann E., Pleninger T., Dransfeld K.**//Appl. Phys. Lett. 1968. Vol. 13. P. 14—17.
334. **Акустические** кристаллы: Справочник/Под ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука. 1982.

ГЛАВА 8
ТЕРМОМЕТРИЯ

А. В. Инюшкин

8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Температура — фундаментальная физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Измерение температуры предполагает построение шкалы температур на основе воспроизведения ряда равновесных состояний — основных реперных (постоянных) точек, которым приписаны определенные значения температур, и создания интерполяционных приборов, реализующих шкалу между ними.

11-я Генеральная конференция по мерам и весам (1960 г.) приняла в качестве основной «Международную термодинамическую температурную шкалу (Кельвина)». Термин «основная шкала» означает, согласно положению конференции, что должна «существовать возможиость в конечном счете отнести к этой шкале результат любого измерення температуры». Термодинамическая шкала температур определяется соотношением, которое выводят из рассмотрения обратимого цикла Карно,

$$Q_1/Q_2 = T_1/T_2,$$

где Q_1 — количество теплоты, которое машина Карно получила при температуре T_1 в обратимом изотермическом процессе; Q_2 — количество теплоты, которое машина отдала при температуре T_2 во втором изотермическом процессе. Термодинамическая шкала не зависит от природы рабочего тела.

Термодинамическую температуру обозначают символом T. Ее единица[*1] — кельвин (символ К) определена как 1/273,16 часть термодинамической температуры тройиой точки воды [1].

Термодинамическую температуру выражают также через температуру Цельсия (символ t), которая определена соотношением

$$t = T - 273{,}15\ \text{K}.$$

Единица температуры Цельсия — градус Цельсия (символ °С). Градус Цельсия равен кельвину.

Прямое использование цикла Карно для измерения температуры обычно приводит к большим экспериментальным погрешностям. Поэтому разработаны практические методы воспроизведения термодинамической температуры, в которых связь между измеряемой величиной и температурой выводят иа основе законов термодинамики или статистической физики. К числу таких соотношений относятся уравнение состояния газа, закон Кюри для парамагнетиков, зависимость скорости звука в газе от температуры, зависимость напряжения тепловых шумов на электрическом сопротивлении от температуры, закон Стефана — Больцмана. Температурные шкалы, установленные с использованием указанных соотношений, зависят от свойств термометрического тела, что приводит к появлению таких характеристик шкалы, как воспроизводимость и точность. Кроме того, некоторые шкалы основаны на приближению выполняющихся закономерностях; возникает понятие инструментальной температуры (магнитной, цветовой и т. п.), отличной от термодинамической.

Экспериментальные трудности, возникающие при воспроизведении термодинамической шкалы, обходят введением практических температурных шкал[*2]. Практические шкалы устанавливают так, чтобы температуры, измеренные по ним, совпадали с термодинамическими в пределах точности соответствующих первичных приборов.

Первая практическая температурная шкала была принята 7-й Генеральной конференцией по мерам и весам и получила название Международной температурной шкалы 1927 г. (МТШ — 27). Переработанная редакция этой шкалы — МТШ — 48 — была принята 9-й Генеральной конференцией по мерам и весам в 1948 г., а исправленная ее редакция — Международная практическая температурная шкала 1948 года (МПТШ — 48) — 11-й Генеральной конференцией (1960 г.) В настоящее время у з а к о н е и а шкала 1968 года — МПТШ — 68 (исправленная редакция 1975 г.). В 1976 г. Консультативный комитет по термометрин при Международном бюро мер и весов рекомендовал для использования в области низких температур *предварительную температурную шкалу* (ПТШ — 76). Планируется, что в 1987 г. Генеральная конференция примет новую международную практическую температурную шкалу, которая будет определенным объединением переработанных и уточненных шкал МПТШ — 68 и ПТШ — 76.

Общие вопросы термометрии в том или ином аспекте рассмотрены в [2—11]. Большое количество информации по всем разделам термометрии имеется в трудах серии международных конференций по термометрии [12].

8.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Помимо шкал Кельвина и Цельсия в некоторых странах используют шкалы Ренкина, Фаренгейта и Реомюра. Между единицами температуры по этим шкалам и кельвином справедливы соотношения:

$$\text{градус Ренкина } (^\circ\text{Ra}) = \frac{5}{9}\,\text{K};$$

$$\text{градус Фаренгейта } (^\circ\text{F}) = \frac{5}{9}\,\text{K};$$

$$\text{градус Реомюра } (^\circ\text{R}) = \frac{5}{4}\,\text{K}.$$

Пересчет значений температуры между шкалами осуществляют по формулам

$$n\,(^\circ\,\text{Ra}) = \frac{5}{9}\,n\,(\text{K}) = \left(\frac{5}{9}\,n - 273{,}15\right)(^\circ\text{C});$$

$$n\,(^\circ\,\text{F}) = \left[\frac{5}{9}\,(n - 32) + 273{,}15\right](\text{K}) =$$

$$= \frac{5}{9}\,(n - 32)\,(^\circ\,\text{C});$$

$$n\,(^\circ\,\text{R}) = \left(\frac{5}{4}\,n + 273{,}15\right)(\text{K}) = \frac{5}{4}\,n\,(^\circ\,\text{C});$$

[*1] Современное определение единицы термодинамической температуры было принято 10-й Генеральной конференцией по мерам и весам (1954 г.). До 1967 г. единица имела название «градус Кельвина».

[*2] Термин «практическая шкала» вводят для того, чтобы отличать значения температуры, определенные по даиой шкале, от соответствующих значений по термодинамической шкале температур.

$$n(\text{K}) = \frac{9}{4}\, n(^\circ\text{Ra}); \quad n(^\circ\text{C}) = \frac{9}{4}\,(n+273{,}15)\,(^\circ\text{Ra});$$

$$n(\text{K}) = \left[\frac{9}{5}\,(n-273{,}15) + 32\right](^\circ\text{F});$$

$$n(^\circ\text{C}) = \left(\frac{9}{5}\,n + 32\right)(^\circ\text{F});$$

$$n(\text{K}) = \frac{4}{5}\,(n-273{,}15)\,(^\circ\text{R}); \quad n(^\circ\text{C}) = \frac{4}{5}\,n(^\circ\text{R}).$$

Международная практическая температурная шкала 1968 года (МПТШ — 68) принята на сессии Международного бюро мер и весов (1968 г.) в соответствии с решением 13-й Генеральной конференции по мерам и весам. Исправленная редакция шкалы принята 15-й Генеральной конференцией по мерам и весам (1975 г.).

Данная шкала установлена для температур выше 13,81 К. В МПТШ — 68 используются международные практические температуры Кельвина (T_{68}) и Цельсия (t_{68}): $t_{68} = T_{68} - 273{,}15$ К. Единицы международной практической температуры — кельвин (К) и градус Цельсия (°С) : 1 К = 1 °С.

Основные реперные точки МПТШ—68 и приписанные им значения T_{68} приведены в табл. 8.1.

В качестве интерполяционного прибора для области температур от 13,81 К до 630,74 °С применяют платиновый термометр сопротивления *1. Его относительное сопротивленне определяют по формуле

$$W(T_{68}) = R(T_{68})/R(273{,}15\,\text{K}),$$

где R — сопротивление термометра. Значение $W(T_{68})$ должно быть не меньше 1,39250 при $T_{68} = 373{,}15$ К.

Для области от 13,81 до 273,15 К температуру T_{68} определяют по формуле

$$W(T_{68}) = W_{\text{ККТ}-68}(T_{68}) + \Delta W_i(T_{68}), \qquad (8.1)$$

где $W_{\text{ККТ}-68}(T_{68})$ — относительное сопротивление, соответствующее стандартной функции (табл. 8.2.). Поправки $\Delta W_i(T_{68})$ при температурах основных реперных точек получают из измеренных значений $W(T_{68})$ и соответствующих значений $W_{\text{ККТ}-68}(T_{68})$ (табл. 8.3.). При промежуточных температурах $\Delta W_i(T_{68})$ определяют по интерполяционным формулам

$$13{,}81\,\text{K} - 20{,}28\,\text{K}: \Delta W_1(T_{68}) = A_1 + B_1 T_{68} + C_1 T_{68}^2 + D_1 T_{68}^3. \qquad (8.2)$$

Константы A_1, B_1, C_1 и D_1 определяют из значений $\Delta W(T_{68})$, измеренных в тройной точке равновесного водорода, при температуре 17,042 К и точке кипения равновесного водорода, а также из значения $d(\Delta W)/dT_{68}$ в точке кипения равновесного водорода, вычисленной по уравнению (8.3):

$$20{,}28\,\text{K} - 54{,}361\,\text{K}: \Delta W_2(T_{68}) = A_2 + B_2 T_{68} + C_2 T_{68}^2 + D_2 T_{68}^3; \qquad (8.3)$$

Константы A_2, B_2, C_2 и D_2 определяют из значений $\Delta W(T_{68})$, измеренных в точке кипения равновесного водорода, точке кипения неона и тройной точке кислорода, а также из значения $d(\Delta W)/dT_{68}$ в тройной точке кислорода, вычисленной из уравнения (8.4):

$$54{,}361\,\text{K} - 90{,}188\,\text{K}: \Delta W_3(T_{68}) = A_3 + B_3 T_{68} + C_3 T_{68}^2. \qquad (8.4)$$

Константы A_3, B_3 и C_3 определяют из значений $\Delta W(T_{68})$, измеренных в тройной точке и точке кипения кислорода (или тройной точке аргона), а также из значения $d(\Delta W)dT_{68}$ в точке кипения кислорода (тройной точке аргона), вычисленной по уравнению (8.5),

$$90{,}188\,\text{K} - 273{,}15\,\text{K}: \Delta W_4(T_{68}) = b_4(T_{68} - 273{,}15\,\text{K}) + e_4(T_{68} - 273{,}15\,\text{K})^3(T_{68} - 373.15\,\text{K}) \qquad (8.5)$$

Константы b_4 и e_4 определяют из значений $\Delta W(T_{68})$, измеренных в точке кипения кислорода (или тройной точке аргона) и точке кипения воды.

Для области от 0 до 630,74 °С температуру t_{68} определяют по формуле

$$t_{68} = t' + 0{,}045\left(\frac{t'}{100\,^\circ\text{C}}\right)\left(\frac{t'}{100\,^\circ\text{C}} - 1\right) \times \times \left(\frac{t'}{419{,}58\,^\circ\text{C}} - 1\right)\left(\frac{t'}{630{,}74\,^\circ\text{C}} - 1\right)^\circ\text{C}. \qquad (8.6)$$

Здесь

$$t' = \left\{\frac{1}{\alpha}\,[W(t') - 1] + \delta\left(\frac{t'}{100\,^\circ\text{C}}\right)\left(\frac{t'}{100\,^\circ\text{C}} - 1\right)\right\}^\circ\text{C}, \qquad (8.7\text{а})$$

где $W(t') = R(t')/R(0\,^\circ\text{C})$.

Константы $R(0\,^\circ\text{C})$, α и δ определяют измерением сопротивления в тройной точке воды, точке кипения воды (или затвердевания олова) и точке затвердевания цинка.

Уравнение (8.7а) эквивалентно уравнению

$$W(t') = 1 + At' + Bt'^2, \qquad (8.7\text{б})$$

где $A = \alpha(1 + \delta/100\,^\circ\text{C})$, °С$^{-1}$; $B = -10^{-4}\alpha\delta$, °С$^{-2}$.

Для области от 630,74 до 1064,43 °С температуру t_{68} определяют по уравнению

$$E(t_{68}) = a + bt_{68} + ct_{68}^2, \qquad (8.8)$$

где $E(t_{68})$ — ЭДС эталонного платинородий-(Pt + 10% Rh)-платинового термоэлектрического термометра, один спай которого находится при 0 °С, а другой — при температуре t_{68}; a, b, c — константы, вычисляемые по значениям $E(t_{68})$ при температуре 630,74±0,2 °С, измеряемой платиновым термометром сопротивления, и в точках затвердевания серебра и золота.

Для области выше 1064,43 °С (1337,58 К) температуру t_{68} ($t_{68} = T_{68} - 273{,}15$ К) определяют по уравнению

$$\frac{L_\lambda(T_{68})}{L_\lambda(T_{68}(\text{Au}))} = \frac{\exp\left[\dfrac{c_2}{\lambda T_{68}(\text{Au})}\right] - 1}{\exp\left[\dfrac{c_2}{\lambda\, T_{68}}\right] - 1}, \qquad (8.9)$$

где $L_\lambda(T_{68})$ и $L_\lambda(T_{68}(\text{Au}))$ — спектральные плотности энергии излучения черного тела для длины волны (в вакууме) λ при температуре T_{68} и в точке затвердевания золота T_{68} (Au); $c_2 = 0{,}014388$ м·К.

Наряду с основными реперными точками МПТШ—68 имеются и другие реперные точки. Некоторые из них и их температуры по МПТШ—68 указаны в табл. 8.4.

Приведенное описание МПТШ—68 (редакция 1975 г.) не является полным. Полный текст см. в [13—15], дополнительная информация имеется в [83].

*1 Практически два платиновых термометра с R (273,15 К), равным 100 и 10 Ом.

Таблица 8.1. **Осиовные реперные (постоянные) точки МПТШ—68 [15] и реперные точки ПТШ—76 [19]**

Вещество и состояние равновесия			Приписанное значение температуры		
			T_{68}, К	t_{68}, °С	T_{76}, К
● Cd	ТСП		—	—	0,519
● Zn	ТСП		—	—	0,851
● Al	ТСП		—	—	1,1796
● In	ТСП		—	—	3,4145
● ^{4}He	ТК		—	—	4,2221
● Pb	ТСП		—	—	7,1999
✳● $e-H_2$	ТТ	(а)	13,81	—259,34	13,8044
✳● $e-H_2$	РЖП	(а)	17,042	—256,108	17,0373
✳● $e-H_2$	ТК	(а)	20,28	—252,87	20,2734
● Ne	ТТ	(б)	24,561	—248,589	24,5591
✳● Ne	ТК	(б)	27,102	—246,048	27,102
✳ O_2	ТТ		54,361	—218,789	—
✳ Ar	ТТ	(г)	83,798	—189,352	—
✳ O_2	ТК	(г)	90,188	—182,962	—
✳ H_2O	ТТ	(в)	273,16	0,01	—
✳ H_2O	ТК	(в, д)	373,15	100	—
✳ Sn	ТЗ	(д)	505,1181	231,9681	—
✳ Zn	ТЗ		692,73	419,58	—
✳ Ag	ТЗ		1235,08	961,93	—
✳ Au	ТЗ		1337,58	1064,43	—

Примечания: ✳ Основная реперная точка МПТШ—6; ● — реперная точка ПТШ—76. 8

Значения температур даны для состояния равновесия при давлении $p_0 = 101\,325$ Па (760 мм рт. ст.), за исключением ТТ, РЖП, ТСП.

а) — $e-H_2$ — равновесный водород: водород, имеющий свою равновесную *орто-пара*-концентрацию при данной температуре;

б) — нормальный изотопный состав Ne : 2,7 ммоль ^{21}Ne и 92 ммоль ^{22}Ne на 0,905 моль ^{20}Ne.

в) — вода должна иметь изотопный состав океанской воды.

г) — Ar ТТ может быть использована вместо O_2 ТК.

д) — Sn ТЗ может быть использована вместо H_2O ТК.

Сокращения:

ТСП — точка сверхпроводящего перехода: температура перехода между сверхпроводящим и нормальным состоянием в нулевом магнитном поле;

ТТ — тройная точка (равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами);

ТК — точка кипения (равновесие между жидкой и парообразной фазами);

РЖП — равновесие между жидкой и парообразной фазами при давлении 33360,6 Па (25/76 p_0);

ТЗ — точка затвердевания (равновесие между твердой и жидкой фазами).

Таблица 8.2. **Значения стандартной функции $W_{\text{ККТ}-68}(T_{68})$ для платиновых термометров сопротивления в области температур от 13,81 до 273,15 К [15]**

$$T_{68} = \sum_{j=0}^{20} a_j \left(\frac{\ln W_{\text{ККТ}-68}(T_{68}) + 3{,}28}{3{,}28} \right)^j \text{ К}$$

j	a_j	j	a_j
0	38,59276	10	239,50285
1	43,44837	11	524,64944
2	39,10887	12	—319,79981
3	38,69352	13	—787,60686
4	32,56883	14	179,54782
5	24,70158	15	700,42832

Продолжение табл. 8.2

j	a_j	j	a_j
6	53,03828	16	29,48666
7	77,35767	17	—335,24378
8	—95,75103	18	—77,25660
9	—223,52892	19	66,76292
		20	24,44911

Стандартная функция $W_{\text{ККТ}-68}(T_{68})$ при $T_{68} = 273{,}15$ К переходит в функцию $W(t_{68})$, заданную уравнениями (8.6) и (8.7) для $\alpha = 3{,}9259668 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$ и $\delta = 1{,}496334°$ С, таким образом, что при этой температуре совпадают значения функций, их первых и вторых производных.

Таблица 8.3. **Заачения $W_{\text{ККТ}-68}(T_{68})$ при температурах реперных точек [15]**

Реперная точка	T_{68}, К	t_{68}, °С	$W_{\text{ККТ}-68}$
$e-H_2$, тройная точка	13,81	—259,34	0,00141208
$e-H_2$, 17,042 К	17,042	—256,108	0,00253445
$e-H_2$, точка кипения	20,28	—252,87	0,00448517
Ne, точка кипения	27,102	—246,048	0,01221272
O_2, тройная точка	54,361	—218,789	0,09197253
Ar, тройная точка	83,798	—189,352	0,21605705
O_2, точка конденсации	90,188	—182,962	0,24379912
H_2O, точка таяния льда	273,15	0	1
H_2O, точка кипения	373,15	100	1,39259668

Таблица 8.4. **Реперные точки [16—18]**

Состояние равновесия*1	T_{68}, К*2
РЖП равновесного водорода	$13{,}81 < T_{68} < 23$
$\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^{2} a_i T_{68}^i$;	
$a_{-1} = -101{,}33782$К; $a_0 = 3{,}940796$;	
$a_1 = 5{,}43201 \cdot 10^{-2}$ К$^{-1}$;	
$a_2 = -1{,}10563 \cdot 10^{-4}$ К$^{-2}$	
✳ ТТ нормального водорода (а)	13,956 — 13,958
✳ ТК нормального водорода (а)	20,397
✳ РЖП нормального водорода (а)	$13{,}956 < T_{68} < 30$
$\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^{2} a_i T_{68}^i$;	
$a_{-1} = -102{,}74982$ К;	
$a_0 = 3{,}994505$;	
$a_1 = 5{,}33898 \cdot 10^{-2}$ К$^{-1}$;	
$a_2 = -1{,}10563 \cdot 10^{-4}$ К$^{-2}$	
$T_{\alpha-\beta}$ твердого кислорода	23,867
РТП неона (б)	$19 < T_{68} < 24{,}561$

Продолжение табл. 8.4

Состояние равновесия*1	T_{68}, K*2
$\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^{2} a_i T_{68}^i$;	
$a_{-1} = -261{,}18205$ K;	
$a_0 = 10{,}275895$;	
$a_1 = -4{,}54082 \cdot 10^{-2}$ K^{-1};	
$a_2 = 10{,}35289 \cdot 10^{-4}$ K^{-2}	
ТТ изотопа неона ^{20}Ne	24,546—24,548
✳ ТТ неона (б)	**24,561**—24,563
✳РЖП неона (б)	$24{,}561 < T_{68} < 40$
$\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^{2} a_i T_{68}^i$;	
$a_{-1} = -244{,}96075$ K;	
$a_0 = 10{,}618417$;	
$a_1 = -8{,}484135 \cdot 10^{-2}$ K^{-1};	
$a_2 = 9{,}78350 \cdot 10^{-4}$ K^{-2}	
$T_{\alpha-\beta}$ твердого азота	35,621 (0,003)
$T_{\beta-\gamma}$ твердого кислорода	$43{,}800_7$—$43{,}801_5$
РТП азота	$56 < T_{68} < 63{,}146$
$\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^{1} a_i T_{68}^i$;	
$a_{-1} = -861{,}621597$ K;	
$a_0 = 12{,}189891$;	
$a_1 = -1{,}006552 \cdot 10^{-2}$ K^{-1}	
✳ ТТ азота	63,1458—**63,146**
✳ ТК азота	**77,344**
✳ РЖП азота	$63{,}146 < T_{68} < 84$
$\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^{2} a_i T_{68}^i +$	
$+ b \ln(T_{68}/T_0)$;	
$a_1 = -930{,}153333$ K;	
$a_0 = 13{,}569758$;	
$a_1 = -3{,}288437 \cdot 10^{-2}$ K^{-1};	
$a_2 = 1{,}671382 \cdot 10^{-4}$ K^{-2};	
$b = -2{,}36680$, $T_0 = 77{,}344$ K	
РТП аргона	$81 < T_{68} < 83{,}798$
$\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^{0} a_i T_{68}^i$	
$a_{-1} = -955{,}992$ K; $a_0 = 11{,}02251$	
ТТ аргона	83,7962—83,8004
✳ ТК аргона	**87,294**—87,2953
РЖП аргона	$83{,}798 < T_{68} < 87{,}294$
$\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^{1} a_i T_{68}^i$;	
$a_{-1} = -894{,}70028$ K;	

Продолжение табл. 8.4

Состояние равновесия*1	T_{68}, K*2
$a_0 = 10{,}593120$;	
$a_1 = -7{,}87615 \cdot 10^{-3}$ K^{-1}	
✳ РЖП кислорода	$54{,}361 < T_{68} < 94$
$\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^{2} a_i T_{68}^i +$	
$+ b \ln(T_{68}/T_0)$;	
$a_{-1} = -1076{,}356664$ K;	
$a_0 = 13{,}726967$;	
$a_1 = -3{,}042408 \cdot 10^{-2}$ K^{-1};	
$a_2 = 1{,}169807 \cdot 10^{-4}$ K^{-2};	
$b = -1{,}6645120$; $T_0 = 90{,}188$ K	
ТТ пропана (β-фаза) (в)	85,515 (0,001)
ТТ этана	90,348—90,352
ТТ метана	90,6854—90,6861
ТК метана	111,6567 (0,001)
ТТ криптона	115,759—115,786
ТК криптона	119,797—119,803
ТТ ксенона	161,375—161,396
ТК ксенона	165,054—165,067
РЖП ксенона	$161{,}391 < T_{68} < 165{,}054$
$\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^{1} a_i T_{68}^i$	
$a_{-1} = -1667{,}160$ K;	
$a_0 = 10{,}71932$;	
$a_1 = -3{,}747979 \cdot 10^{-3}$ K^{-1}	
✳ ТВ двуокиси углерода	194,6707—**194,674**
РТП двуокиси углерода	$170 < T_{68} < 194{,}7$
$\ln(p/p_0) = \sum_{i=-1}^{2} a_i T_{68}^i$	
$a_{-1} = -3900{,}224$ K;	
$a_0 = 28{,}57660$;	
$a_1 = -6{,}687764 \cdot 10^{-2}$ K^{-1};	
$a_2 = 1{,}181504 \cdot 10^{-4}$ K^{-2}	
ТТ двуокиси углерода	216,578—216,581
ТТ ртути	234,307—234,3083
✳ ТЗ ртути	**234,314**
ТТ бромбензола	242,419 (0,010)
✳ Точка таяния льда	**273,15**
✳ ТТ феноксибензола	**300,02** (0,010)
ТП галлия	302,920—302,922
ТТ галлия	302,9238—302,9241
ТЗ натрия	370,969
✳ ТТ бензойной кислоты	**395,520** (0,002)
ТП бензойной кислоты	395,533 (0,002)
✳ ТЗ индия	**429,784**
✳ ТЗ висмута	**544,92**
✳ ТЗ кадмия	**594,258**
✳ ТЗ свинца	**600,652**
✳ ТК ртути	**629,81**
✳ РЖП ртути	$622{,}15 < T_{68} < 636{,}15$

Продолжение табл. 8.4

Состояние равновесия*1	T_{68}, К*2
$t_{68} = 356{,}66 + 55{,}552\,(p/p_0 - 1) - 23{,}03\,(p/p_0 - 1)^2 - 14{,}0\,(p/p_0 - 1)^3$ для p от 90 до 104 кПа	
✳ ТК серы	**717,824**
✳ РЖП серы	708,15<T_{68}<726,15
$t_{68} = 444{,}674 + 69{,}010\,(p/p_0 - 1) - 27{,}48\,(p/p_0 - 1)^2 + 19{,}14\,(p/p_0 - 1)^3$ для p от 90 до 104 кПа	
✳ ТП медь-алюминиевой эвтектики	**821,41**
✳ ТЗ сурьмы	**903,905**
✳ ТЗ алюминия	**933,61**
ТП медь-серебряной эвтектики	1052,72 (0,10)
✳ ТЗ меди	**1358,03 (0,01)**
ЯТП (0,653 мкм) железа	1670
ЯТП (0,653 мкм) палладия	1688 (5)
ЯТП (0,997 мкм) титана	1711 (6)
✳ ТЗ никеля	**1728**
✳ ТЗ кобальта	**1768**
ЯТП (0,653 мкм) титана	1800 (6)
ТП железа	1808
✳ ТП палладия	**1827 (4)**
ЯТП (0,993 мкм) ванадия	1875 (7)
ЯТП (0,650 мкм) циркония	1940
ТП титана	1941,5—1945
ЯТП (0,650 мкм) ванадия	1988 (4)
ЯТП (0,653 мкм) ванадия	1992 (7)
✳ ТЗ платины	**2042**
ТП циркония	2128
✳ ТЗ родия	**2236**
ЯТП (0,650 мкм) рутения	2294 (8)
✳ ТП оксида алюминия (Al_2O_3)	**2327**
ЯТП (0,650 мкм) ниобия	2425—2433
ЯТП (0,653 мкм) молибдена	2528—2531

Продолжение табл. 8.4

Состояние равновесия*1	T_{68}, К*2
ТП рутения	2607 (10)
ЯТП (0,995 мкм) тантала	2620 (8)
ТП оксида иттрия (Y_2O_3)	2712 (12)
✳ ТЗ иридия	**2720**
✳ ТП ниобия	**2742—2750**
ЯТП (0,653 мкм) тантала	2846 (8)
ТП оксида бериллия (BeO)	2851 (9)
✳ ТП молибдена	**2896**
✳ ТП вольфрама	**3695**

* Вторичная реперная точка МПТШ — 68 (редакция 1975 г; приписанное ей значение температуры выделено жирным шрифтом. Приведенные формулы удобны для расчетов $p\,(T_{68})$ газов, но они отличаются от формул, рекомендованных в МПТШ — 68.

*1 Значения температур даны для состояний равновесия при давлении $p_0 = 101\,325$ Па (760 мм рт. ст.), за исключением тройных точек и точек, для которых область давлений указана явно.

*2 Для формул, описывающих зависимость $p\,(T_{68})$, указаны области их применения.

(а) — нормальный водород — водород, *орто-пара*-концентрация которого соответствует комнатной температуре: примерно 75% *орто-* и 25% *пара*-водорода.

(б) — нормальный изотопический состав неона: 2,7 *ммоль*[21] Ne и 92 ммоль ^{22}Ne на 0,905 моль ^{20}Ne.

(в) — значение T_{68} при $1/F = 1$ (где F — доля образца в жидкой фазе).

Сокращения:

ТТ — тройная точка; ТК — точка кипения; ТП — точка плавления; ТЗ — точка затвердевания; $T_{\alpha-\beta}$ — точка α — β-перехода; $T_{\beta-\gamma}$ — точка β — γ-перехода; РЖП — равновесие между жидкой и парообразной фазами; РТП — равновесие между твердой и парообразной фазами; ЯТП — яркостная температура (для данной длины волны) в точке плавления.

Яркостные температуры определены для образцов, находящихся в вакууме или среде инертного газа при атмосферном давлении. Поправки на давление пренебрежимо малы по сравнению с погрешностью измерений.

В целом погрешность реперных точек меньше чем $\pm 0{,}01$ К при $T < 1000$ К; меньше чем $\pm 0{,}1$ К при 1000 К $< T <$ 1400 К и изменяется в пределах ± 10 К при $T > 1400$ К.

Предварительная температурная шкала 1976 года (ПТШ—76) рекомендована Консультативным комитетом по термометрии (ККТ) при Международном бюро мер и весов для использования в диапазоне от 0,5 до 30 К [19]. ККТ разработал эту шкалу в силу того, что температуры, определенные по температурным шкалам, построенным по давлению паров гелия (шкала ^{3}He 1962 г. [21] и шкала ^{4}He 1958 г. [20]) и по нижнему участку МПТШ—68, существенно отличаются от термодинамической температуры и, кроме того, не согласуются между собой. ПТШ—76 построена с учетом гладкости по отношению к термодинамической шкале и максимального к ней приближения и непрерывности с МПТШ—68 в точке 27,1 К. Реперные точки ПТШ—76 приведены в табл. 8.1. Дополнительную информацию о ПТШ — 76 см. в [83].

В 1982 г. ККТ рекомендовал использовать уравнения для зависимости давления насыщенных паров изотопов гелия от температуры T_{76} [23] (см. также [84]). Эти же уравнения рекомендовано использовать для вычисления T_{76} по измеренным значениям давления паров гелия (см. табл. 8.27 и 8.28).

Таблица 8.5. **Ориентировочные значения расхождений $t_{68} - t_{48}$, °С, между температурами по МПТШ — 68 и МПТШ — 48 [15]**

а) Для диапазона температур от —180 до 0° С

t_{68}, °С	Приращение температуры, °С										
	0	—10	—20	—30	—40	—50	—60	—70	—80	—90	—100
—100	0,022	0,013	0,003	—0,006	—0,013	—0,013	—0,005	0,007	0,012	—	—
0	0,000	0,006	0,012	0,018	0,024	0,029	0,032	0,034	0,033	0,029	0,022

б) Для диапазона температур от 0 до 1070° С

t_{68}, °С	Приращение температуры, °С										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,000	—0,004	—0,007	—0,009	—0,010	—0,010	—0,010	—0,008	—0,006	—0,003	0,000
100	0,000	0,004	0,007	0,012	0,016	0,020	0,025	0,029	0,034	0,038	0,043
200	0,043	0,047	0,051	0,054	0,058	0,061	0,064	0,067	0,069	0,071	0,073
300	0,073	0,074	0,075	0,076	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,076	0,076
400	0,076	0,075	0,075	0,075	0,074	0,074	0,074	0,075	0,076	0,077	0,079
500	0,079	0,082	0,085	0,089	0,094	0,100	0,108	0,116	0,126	0,137	0,150
600	0,150	0,165	0,182	0,200	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34	0,36	0,39
700	0,39	0,42	0,45	0,47	0,50	0,53	0,56	0,58	0,61	0,64	0,67
800	0,67	0,70	0,72	0,75	0,78	0,81	0,84	0,87	0,89	0,92	0,95
900	0,95	0,98	1,01	1,04	1,07	1,10	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24
1000	1,24	1,27	1,30	1,33	1,36	1,39	1,42	1,44			

в) Для диапазона температур от 1100 до 4000 °С

t_{68}, °С	Приращение температуры, °С										
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1000	—	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2
2000	3,2	3,5	3,7	4,0	4,2	4,5	4,8	5,0	5,3	5,6	5,9
3000	5,9	6,2	6,5	6,9	7,2	7,5	7,9	8,2	8,6	9,0	9,3

Таблица 8.6. Расхождения между ПТШ — 76 (T_{76}) и МПТШ — 68 (T_{68}) [19]

T_{68}, К	$T_{68} - T_{76}$, мК	T_{68}, К	$T_{68} - T_{76}$, мК	T_{68}, К	$T_{68} - T_{76}$, мК
13,81	5,6	19,0	7,4	24,5	2,1
14,0	4,6	19,5	7,3	25,0	1,6
14,5	3,0	20,0	6,9	25,5	1,1
15,0	2,0	20,5	6,4	26,0	0,7
15,5	2,2	21,0	5,8	26,5	0,3
16,0	2,6	21,5	5,3	27,0	0,0
16,5	3,6	22,0	4,8	27,1	0,0
17,0	4,6	22,5	4,2	28,0	0,0
17,5	5,6	23,0	3,7	29,0	0,0
18,0	6,5	23,5	3,2	30,0	0,0
18,5	7,2	24,0	2,7		

Таблица 8.7. Расхождения между ПТШ — 76 (T_{76}) и шкалами, построенными по давлению паров гелия (T_{58}, T_{62}) [19]

$T_{ср}$, К	$T_{ср} - T_{76}$, мК	$T_{ср}$, К	$T_{ср} - T_{76}$, мК	T_{58}, К	$T_{58} - T_{76}$, мК
0,5	—1,9	1,8	—3,9	3,2	—6,6
0,6	—2,1	2,0	—4,1	3,4	—6,8
0,8	—2,5	2,2	—4,4	3,6	—7,0
1,0	—2,9	2,4	—4,9	3,8	—7,0
1,2	—3,2	2,6	—5,4	4,0	—7,1
1,4	—3,5	2,8	—5,9	4,2	—7,1
1,6	—3,7	3,0	—6,3	4,5	—7,1
		3,2	—6,6	5,0	—7,1

Примечание. $T_{ср}$ — среднее из T_{62} и T_{58} в области от 0,5 до 3,2 К.

Таблица 8.8. Расхождение между ПТШ — 76 (T_{76}) и шкалами, воспроизводящимися государственными первичными эталонами ($T_э$) [22]

T_{76}, К	$T_э - T_{76}$, мК	T_{76}, К	$T_э - T_{76}$, мК	T_{76}, К	$T_э - T_{76}$, мК	T_{76}, К	$T_э - T_{76}$, мК
		3,9	—7,0	8,5	+1,5	17,0	+4,6
1,8	—2,1	4,2	—6,5	9,0	+4,1	18,0	+4,9
2,0	—3,8	4,5	—5,3	9,5	+5,4	19,0	+5,9
2,2	—4,4	5,0	—5,0	10,0	+5,8	20,0	+6,5
2,4	—4,4	5,5	—6,0	11,0	+5,5	21,0	+6,9
2,6	—4,3	6,0	—7,4	12,0	+4,5	22,0	+7,0
3,0	—5,0	6,5	—8,1	13,0	+4,2	23,0	+6,4
3,3	—6,1	7,0	—7,1	14,0	+4,3	24,0	+5,9
3,6	—6,9	7,5	—4,6	15,0	+4,3	25,0	+4,2
		8,0	—1,3	16,0	+4,4	26,0	+3,0
						27,1	+2,0

Наблюдаемое при 27,1 К расхождение 2 мК объясняется различием в реализации точки кипения неона, принятой во ВНИИФТРИ и при построении ПТШ—76. В случае, когда необходимо иметь градуировки термометров, непрерывные в точке 27,1 К (т. е. непрерывно переходящие в МПТШ—68, воспроизводимую государственным первичным эталоном), рекомендуется уменьшить приведенные в таблице поправки на $\Delta T = 2{,}7 \cdot 10^{-6}\ T^2$, К.

8.3. ЖИДКОСТНО-СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Жидкостная термометрия основана на тепловом расширении жидкости. Вследствие различия теплового расширения жидкости и стеклянного (кварцевого) резервуара, в который она заключена, при изменении температуры изменяется длина столбика жидкости, находящейся в капилляре. Температуру определяют по положению мениска относительно шкалы, нанесенной непосредственно на капилляр или на пластинку, жестко соединенную с ним. Жидкостные термометры применяют для измерения температур от —200 до 1200 °С. В табл. 8.9 и 8.10 приведены сведения о свойствах важнейших термометрических жидкостей и стекол, используемых при изготовлении термометров.

Точность измерений зависит от глубины погружения жидкостного термометра в измеряемую среду. Погружать термометр следует до отсчитываемого деления шкалы или до специально нанесенной на шкале черты. Если это невозможно, то вводят поправку на выступающий столбик, равную для термометров, градуированных при полном погружении,

$$\Delta t = l\alpha\,(t_1 - t_2),$$

при частичном погружении

$$\Delta t = l\alpha\,(t_0 - t_2),$$

где t_2 — средняя температура выступающего столбика, °С; t_1 — произведенный отсчет по термометру, °С; t_0 — температура столбика при градуировке, °С; l — длина выступающего столбика, выраженная в делениях шкалы, °С; α — коэффициент поправки на выступающий столбик, °С$^{-1}$.

Вопросы жидкостной термометрии рассмотрены в [6, 10, 24—30].

Таблица 8.9. **Свойства веществ, используемых в жидкостно-стеклянных термометрах [24]**

Вещество	Формула	β*, 10^{-6} К$^{-1}$	t, °С	
			затвердевания	кипения
Ртуть	Hg	182,5	—38,87	356,7
Таллиевая амальгама	8,5 % Tl	182	—60	От 360 до 1460
Сложная амальгама	—	180	—90	От 360 до 2000
Галлий	Ga	55	29,8	2070
Ацетон	$CO(CH_3)_2$	1310	От —93,9 до —94,9	56,0
Керосин	—	1150	От —50 до —15	От 200 до 290
Пентан	C_5H_{12}	1550	Ниже —200	От 30 до 40
Петролейный эфир	—	1220	Ниже —100	От 40 до 70
Спирт этиловый	C_2H_5OH	1100	От —111,8 до —117,3	От 77,7 до 78,4
Спирт метиловый	CH_3OH	1220	От —93.8 до —97,8	От 64,2 до 66,0
Сероуглерод	CS_2	1210	—113,0	46,0
Толуол	$C_6H_{15}CH_3$	1090	От —92,4 до —102,0	От 109,2 до 110.6

* β — коэффициент объемного расширения.

Таблица 8.10. **Значения коэффициента поправки на выступающий столбик для некоторых жидкостно-стеклянных термометров [24]**

Сорт стекла	Жидкость	α, 10^{-6} °С$^{-1}$	Сорт стекла	Жидкость	α, 10^{-6} °С$^{-1}$
360 (ГОСТ 1224—71)	Ртуть	160	Плавленый кварц	Ртуть	180
500 »	»	165	Стекло при $t>0°$ С	Органическая	1300
650 »	»	170	Стекло при $t<0°$ С	»	800

Таблица 8.11. **Пределы допускаемых погрешностей показаний жидкостно-стекляиных термометров, °С [24]**

Диапазон измеряемых температур		Цена деления шкалы, °С							
от	до	0,01	0,02	0,05	0,1; 0,2	0,5	1	2	5; 10
—35	0	±0,05	±0,08	±0,10	±0,3	±1,0	±1	±2	±5
0	100	±0,04	±0,08	±0,10	±0,2	±1,0	±1	±2	±5
100	200	—	±0,10	±0,25	±0,4	±1,0	±2	±2	±5
200	300	—	—	±0,40	±1,0	±2,0	±3	±4	±5
300	400	—	—	—	±1,0	±3,0	±4	±4	±10
400	500	—	—	—	—	±3,0	±5	±5	±10
500	600	—	—	—	—	—	±6	±6	±10
600	650	—	—	—	—	—	±6	±6	±15

8.4. ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Принцип действия термометров сопротивления (ТС) основан на зависимости электрического сопротивления металлов, сплавов и полупроводников от температуры. Для определения температуры по измеренному значению электрического сопротивления пользуются эмпирическими формулами или таблицами. Термометры для точных измерений (с погрешностью менее 0,001 К) — платиновый, германиевый — градуируют индивидуально. ТС применяют для измерения температур примерно от 0,01 К до 1100 °С.

Широкое распространение для измерения температур от —200 до 750 °С (реже от —260 до 1100 °С) получили платиновые ТС (ТСП) благодаря исключительно хорошим термометрическим свойствам платины [10, 11, 24—27, 31—38]. В области от —200 до 200 °С часто применяют медные ТС (ТСМ) [24, 39]. Для ТСП и ТСМ созданы стандартные градуировочные таблицы (табл. 8.12, 8.13). Характеристики промышленных ТС см. в [24, 33—35].

Полупроводниковые ТС используют обычно для измерения температур ниже 0 °С [11, 43, 47]. Основное преимущество полупроводниковых ТС состоит в том, что их чувствительность гораздо выше чувствительности металлических ТС при низких температурах. В низкотемпературной термометрии применяют германиевые [11, 35, 40—42], угольные [44], арсенид-галлиевые ТС [45].

Наряду с ТС для измерения низких температур разработаны термодиоды из Ge, Si, GaAs. Термометрическим параметром таких термометров является напряжение на диоде, смещенном в прямом направлении [46].

Полупроводниковые термометры имеют сложную и плохо воспроизводимую от образца к образцу зависимость термометрического параметра от температуры, что не позволяет создать для них стандартные градуировочные характеристики.

8.5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Термоэлектрическая термометрия основана на температурной зависимости термо-ЭДС (E), возникающей в термопаре — проводнике, состоящем из двух соединенных разнородных электропроводящих элементов (обычно металлических проводников, реже полупроводников). Термопары широко используются для измерения температур примерно от 4 до 3000 К.

Погрешность определения температуры с помощью термопар составляет, как правило, несколько кельвинов, а у некоторых достигает 0,01 К. Точность термопары (дифференциального прибора) зависит от точности поддержания и измерения температуры свободного (реперного) спая термопары.

Для определения температуры по измеренной ЭДС пользуются таблицами или эмпирическими формулами. Представленные зависимости $E(T)$ являются базовыми для градуировки конкретных термопар. Поправочная функция в виде степенно́го полинома находится по отклонениям значений ЭДС от табличных в нескольких температурных точках. Градуировочные таблицы стандартных термопар соответствуют реальным в пределах указываемой рабочей погрешности.

Зависимость $E(t)$ большинства термопар в рабочем диапазоне температур (либо в его части) может быть аппроксимирована полиномом вида $E=\sum_{i=0}^{n} a_i t^i$. Коэффициенты полиномов приведены в [10, 60].

Вопросы термоэлектрической термометрии рассмотрены в [6, 25, 49, 52].

Таблица 8.12. Стандартная градуировочная таблица платинового термометра сопротивления [24]

Электрическое сопротивление ТСП ГОСТ 6651—78, отн. ед., $(R(t)/R(0°\,C))$; температура, °С (МПТШ—68)

t, °С	Приращение температуры, °С				
	0	2	4	6	8
—260	0,00406	—	—	—	—
—250	0,01022	0,00827	0,00673	0,00555	0,00465
—240	0,02701	0,02269	0,01886	0,01550	0,01262
—230	0,05487	0,04855	0,04257	0,03696	0,03176
—220	0,09058	0,08298	0,07559	0,06842	0,06151
—210	0,13075	0,12248	0,11431	0,10626	0,09834
—200	0,17307	0,16450	0,15598	0,14751	0,13909
—190	0,21657	0,20784	0,19909	0,19035	0,18168
—180	0,25986	0,25122	0,25458	0,23392	0,22525
—170	0,30279	0,29422	0,28563	0,27703	0,26842
—160	0,34552	0,33699	0,32846	0,31992	0,31137
—150	0,38799	0,37949	0,37101	0,36252	0,35402
—140	0,43008	0,42168	0,41326	0,40483	0,39639
—130	0,47195	0,46359	0,45523	0,44686	0,43847
—120	0,51359	0,50528	0,49696	0,48862	0,48029
—110	0,55500	0,54673	0,53846	0,53018	0,52189
—100	0,59621	0,58799	0,57975	0,57151	0,56326
— 90	0,63724	0,62906	0,62086	0,61265	0,60443
— 80	0,67812	0,66996	0,66179	0,65362	0,64544
— 70	0,71883	0,71070	0,70256	0,69443	0,68628
— 60	0,75940	0,75130	0,74319	0,73508	0,72695
— 50	0,79983	0,79175	0,78368	0,77559	0,76750
— 40	0,84012	0,83207	0,82402	0,81596	0,80790
— 30	0,88028	0,87226	0,86423	0,85629	0,84816
— 20	0,92032	0,91231	0,90431	0,89631	0,88830
— 10	0,96022	0,95225	0,94428	0,93629	0,92830
— 0	1,00000	0,99206	0,98411	0,97615	0,96819
0	1,00000	1,00794	1,01587	1,02380	1,03172
10	1,03965	1,04757	1,05548	1,06339	1,07129
20	1,07919	1,08708	1,09498	1,10286	1,11073
30	1,11861	1,12647	1,13434	1,14220	1,15006
40	1,15791	1,16575	1,17359	1,18142	1,18925
50	1,19708	1,20490	1,21271	1,22053	1,22833
60	1,23613	1,24393	1,25172	1,25951	1,26729
70	1,27507	1,28283	1,29060	1,29836	1,30612
80	1,31388	1,32162	1,32936	1,33710	1,34484
90	1,35256	1,36028	1,36801	1,37572	1,38343
100	1,39113	1,39883	1,40653	1,41423	1,42191
110	1,42959	1,43727	1,44494	1,45260	1,46026
120	1,46792	1,47558	1,48322	1,49087	1,49851
130	1,50613	1,51377	1,52138	1,52900	1,53662
140	1,54423	1,55183	1,55943	1,56704	1,57463
150	1,58221	1,58979	1,59736	1,60494	1,61251
160	1,62007	1,62763	1,63518	1,64274	1,65027
170	1,65781	1,66535	1,67288	1,68040	1,68793
180	1,69544	1,70295	1,71045	1,71795	1,72545
190	1,73294	1,74043	1,74791	1,75540	1,76287
200	1,77033	1,77779	1,78525	1,79271	1,80016
210	1,80760	1,81504	1,82248	1,82991	1,83734
220	1,84475	1,85217	1,85958	1,86698	1,87439
230	1,88179	1,88919	1,89658	1,90397	1,91135
240	1,91873	1,92610	1,93347	1,94083	1,94819
250	1,95552	1,96287	1,97021	1,97755	1,98488
260	1,99221	1,99953	2,00686	2,01417	2,02148
270	2,02878	2,03608	2,04338	2,05067	2,05796
280	2,06523	2,07251	2,07978	2,08705	2,09432
290	2,10158	2,10883	2,11607	2,12332	2,13056
300	2,13779	2,14503	2,15225	2,15947	2,16668
310	2,17390	2,18111	2,18830	2,19550	2,20270
320	2,20988	2,21708	2,22425	2,23142	2,23859
330	2,24576	2,25292	2,26007	2,26723	2,27437
340	2,28151	2,28865	2,29578	2,30291	2,31002
350	2,31715	2,32427	2,33137	2,33848	2,34558

t, °C	Приращение температуры, °C				
	0	2	4	6	8
360	2,35267	2,35977	2,36685	2,37393	2,38100
370	2,38807	2,39515	2,40220	2,40926	2,41631
380	2,42336	2,43040	2,43744	2,44447	2,45150
390	2,45853	2,46555	2,47256	2,47957	2,48657
400	2,49358	2,50057	2,50756	2,51455	2,52153
410	2,52852	2,53549	2,54246	2,54942	2,55638
420	2,56333	2,57028	2,57722	2,58416	2,59110
430	2,59803	2,60495	2,61187	2,61879	2,62570
440	2,63260	2,63950	2,64640	2,65330	2,66019
450	2,66707	2,67395	2,68082	2,68769	2,69456
460	2,70142	2,70827	2,71512	2,72196	2,72880
470	2,73564	2,74247	2,74930	2,75611	2,76292
480	2,76975	2,77655	2,78335	2,79014	2,79694
490	2,80372	2,81051	2,81729	2,82406	2,83083
500	2,83760	2,84435	2,85110	2,85785	2,86460
510	2,87134	2,87808	2,88481	2,89152	2,89825
520	2,90496	2,91168	2,91839	2,92508	2,93178
530	2,93847	2,94516	2,95184	2,95852	2,96518
540	2,97185	2,97852	2,98518	2,99182	2,99848
550	3,00511	3,01176	3,01838	3,02502	3,03163
560	3,03826	3,04488	3,05148	3,05809	3,06468
570	3,07128	3,07787	3,08446	3,09104	3,09762
580	3,10418	3,11074	3,11731	3,12386	3,13040
590	3,13694	3,14348	3,15001	3,15655	3,16308
600	3,16960	3,17611	3,18262	3,19913	3,19563
610	3,20212	3,20861	3,21510	3,22158	3,22806
620	3,23453	3,24100	3,24746	3,25392	3,26037
630	3,26682	3,27325	3,27968	3,28611	3,29253
640	3,29894	3,30536	3,31178	3,31818	3,32458
650	3,33098	3,33737	3,34375	3,35013	3,35650
660	3,36288	3,36924	3,37560	3,38196	3,38830
670	3,39465	3,40099	3,40732	3,41365	3,41998
680	3,42631	3,43263	3,43896	3,44527	3,45158
690	3,45788	3,46417	3,47046	3,47674	3,48302
700	3,48931	3,49588	3,50184	3,50810	3,51435
710	3,52061	3,52686	3,53310	3,53934	3,54557
720	3,55180	3,55808	3,56426	3,57048	3,57670
730	3,58291	3,58911	3,59531	3,60149	3,60768
740	3,61387	3,62004	3,62621	3,63238	3,63854
750	3,64470	3,65085	3,65700	3,66314	3,66928
760	3,67542	3,68156	3,68769	3,69382	3,69994
770	3,70606	3,71218	3,71828	3,72438	3,73047
780	3,73655	3,74265	3,74873	3,75480	3,76087
790	3,76693	3,77300	3,77905	3,78510	3,79114
800	3,79719	3,80322	3,80925	3,81527	3,82129
810	3,82732	3,83334	3,83935	3,84536	3,85137
820	3,85737	3,86335	3,86934	3,87533	3,88130
830	3,88727	3,89323	3,89919	3,90514	3,91110
840	3,91705	3,92300	3,92894	3,93487	3,94079
850	3,94672	3,95264	3,95856	3,96447	3,97037
860	3,97627	3,98217	3,98806	3,99394	3,99982
870	4,00571	4,01158	4,01746	4,02333	4,02919
880	4,03505	4,04091	4,04675	4,05258	4,05841
890	4,06425	4,07007	4,07589	4,08171	4,08751
900	4,09333	4,09912	4,10493	4,11072	4,11652
910	4,12231	4,12808	4,13385	4,13961	4,14537
920	4,15114	4,15690	4,16265	4,16840	4,17414
930	4,17989	4,18561	4,19133	4,19705	4,20277
940	4,20849	4,21420	4,21991	4,22561	4,23130
950	4,23699	4,24269	4,24838	4,25406	4,25974
960	4,26542	4,27107	4,27672	4,28238	4,28902
970	4,29366	4,29930	4,30494	4,31056	4,31619
980	4,32181	4,32742	4,33303	4,33863	4,34422
990	4,34982	4,35542	4,36101	4,36660	4,37218
1000	4,37776	4,38332	4,38888	4,39444	4,40000
1010	4,40554	4,41108	4,41662	4,42215	4,42768

t, °C	Приращение температуры, °C				
	0	2	4	6	8
1020	4,43321	4,43874	4,44426	4,44976	4,45527
1030	4,46077	4,46627	4,47177	4,47726	4,48274
1040	4,48823	4,49371	4,49918	4,50464	4,51009
1050	4,51555	4,52100	4,52645	4,53189	4,53732
1060	4,54276	4,54819	4,55361	4,55903	4,56446
1070	4,56987	4,57529	4,58069	4,58610	4,59149
1080	4,59688	4,60226	4,60764	4,61302	4,61839
1090	4,62376	4,62912	4,63448	4,63983	4,64518
1100	4,65052	4,65586	4,66119	4,66652	4,67184

Таблица 8.13. **Стандартная градуировочная таблица медного термометра сопротивления [24]**

Электрическое сопротивление ТСМ (ГОСТ 6651—78), отн. ед. $(R(t)/R(0°C))$; температура, °С (МПТШ—68)

t, °C	Приращение температуры, °C				
	0	2	4	6	8
—200	0,12160	—	—	—	—
—190	0,16270	0,15420	0,14590	0,13780	0,12970
—180	0,20610	0,19730	0,18850	0,17980	0,17120
—170	0,25080	0,24170	0,23270	0,22380	0,21490
—160	0,29620	0,28710	0,27800	0,26890	0,25990
—150	0,34180	0,33270	0,32360	0,31450	0,30530
—140	0,38730	0,37820	0,36920	0,36000	0,35090
—130	0,43210	0,42320	0,41430	0,40530	0,39640
—120	0,47690	0,46800	0,45900	0,45000	0,44100
—110	0,52160	0,51260	0,50370	0,49480	0,48590
—100	0,56610	0,55720	0,54830	0,53940	0,53050
— 90	0,61030	0,60150	0,59270	0,58380	0,57490
— 80	0,65420	0,64540	0,63660	0,62790	0,61910
— 70	0,69790	0,68920	0,68050	0,67170	0,66300
— 60	0,74150	0,73280	0,72410	0,71540	0,70670
— 50	0,78480	0,77620	0,76750	0,75880	0,75020
— 40	0,82810	0,81950	0,81080	0,80220	0,79350
— 30	0,87120	0,86260	0,85400	0,84540	0,83670
— 20	0,91420	0,90560	0,89700	0,88840	0,87980
— 10	0,95720	0,94860	0,94000	0,93140	0,92280
— 0	1,00000	0,99144	0,98288	0,97432	0,96576
0	1,00000	1,00856	1,01712	1,02568	1,03424
10	1,04281	1,05138	1,05994	1,06850	1,07707
20	1,08563	1,09419	1,10275	1,11131	1,11988
30	1,12844	1,13700	1,14556	1,15412	1,16268
40	1,17124	1,17980	1,18836	1,19692	1,20548
50	1,21404	1,22260	1,23116	1,23972	1,24828
60	1,25684	1,26540	1,27396	1,28252	1,29107
70	1,29963	1,30819	1,31675	1,32531	1,33386
80	1,34242	1,35098	1,35954	1,36810	1,37666
90	1,38522	1,39377	1,40233	1,41088	1,41945
100	1,42800	1,43656	1,44512	1,45368	1,46224
110	1,47079	1,47935	1,48790	1,49646	1,50502
120	1,51357	1,52213	1,53069	1,53924	1,54780
130	1,55635	1,56491	1,57346	1,58202	1,59058
140	1,59913	1,60769	1,61625	1,62481	1,63336
150	1,64192	1,65048	1,65904	1,66759	1,67615
160	1,68470	1,69326	1,70182	1,71037	1,71893
170	1,72748	1,73604	1,74460	1,75316	1,76171
180	1,77026	1,77882	1,78738	1,79594	1,80449
190	1,81305	1,82160	1,83016	1,83872	1,84727
200	1,85583	—	—	—	—

Обзор термопар для измерения высоких температур см. в [37, 50, 51, 53]. Обширный каталог термопар и обсуждение их характеристик см. в [54, 60].

Таблица 8.14. **Значения эксплуатационных характеристик термопар [24, 26, 27, 34, 50, 60]**

Термопара	Рабочий интервал*, К	Максимальная термо-ЭДС, мВ	Погрешность, К	Рабочая среда
Cu — константан	10—670 (870)	21 (34,3)	0,1—5	Окислительная, воздух до 470 К
Cu — Au + 1,9% Co	2—270	10,2	0,1—1,5	Окислительная, воздух
Хромель — Au + 1,9% Co	2—270	13,8	0,1—1,5	То же
Cu — Au + 0,07% Fe	2—270	1,7	0,05—0,3	»
Хромель — Au + 0,07% Fe	2—270	5,2	0,05—0,3	»
Cu — копель	20—320	6,1	0,1—5	»
Fe — константан	70—1000 (1500)	41 (70)	0,5—3	Окислительная до 1000 К, нейтральная
Pt — Pt + 10% Rh	270—1570 (1870)	13 (16,6)	0,5—6	Окислительная
Pt + 6% Ph — Pt + 30% Rh	570—1870 (2070)	11 (14)	0,5—7	»
Хромель — копель	220—870 (1070)	49 (66)	1—3	Окислительная, нейтральная
Хромель — алюмель	220—1270 (1570)	41 (52)	4—10	То же
W + 5% Re — W + 20% Re	270—2070 (2770)	27 (33,6)	8—30	Вакуум, инертная, слабовосстановительная
Никель — нихром	250—1500	49	1—10	Окислительная
Нихросил — нисил	20—1570	47,5	<10	Окислительная, воздух
Ir — Ir + 60% Rh	500—2400	11,6	10—22	Вакуум, окислительная, слабовосстановительная
W — Mo	1300—3000	9	10	Вакуум, инертная, восстановительная

* В скобках указаны значения температур, до которых кратковременно можно применять термопары.

Таблица 8.15. **Градуировочная таблица низкотемпературных термопар [55, 56]**

Температура свободных концов 0° С; константан (ГОСТ 5307—77): 59,9% Cu, 40±1 % Ni, 0,5 ± 0,1% Mn; хромель: 90—91 % Ni, 9—10 % Cr

T, К	Константан — Cu		Au + 1,9 % Co — Cu		Au + 1,9 % Co — хромель		Au + 0,07 % Fe — Cu		Au+0,07 % Fe—хромель	
	E, мкВ	dE/dT, мкВ/К	E, мкВ	dE/dT, мкВ/К	E, мкВ	dE/dT, мкВ/К	E, мкВ	dE/dT, мкВ/К	E, мкВ	dE/dT, мкВ/К
2	6029,25	—0,100	10263,0	—2,812	13813,0	—2,868	1729,9	—10,875	5262,7	—11,05
3	6029,00	—0,412	10259,7	—3,718	13809,5	—3,985	1718,6	—11,676	5251,2	—12,08
4	6028,43	—0,719	10255,5	—4,609	13805,0	—5,077	1706,6	—12,38	5238,6	—12,97
5	6027,56	—1,023	10250,5	—5,486	13799,4	—6,144	1693,9	—12,97	5225,3	—13,73
6	6026,39	—1,323	10244,6	—6,349	13792,7	—7,188	1680,7	—13,48	5211,2	—14,38
7	6024,91	—1,620	10237,8	—7,197	13785,0	—8,210	1667,0	—13,90	5196,5	—14,93
8	6023,15	—1,913	10230,2	—8,031	13776,3	—9,209	1652,9	—14,23	5181,4	—15,39
9	6021,09	—2,203	10221,7	—8,849	13766,6	—10,19	1638,5	—14,48	5165,8	—15,77
10	6018,7	—2,489	10212,5	—9,653	13755,9	—11,14	1624,0	—14,67	5149,8	—16,08
12	6013,2	—3,051	10191,6	—11,22	13731,8	—13,00	1594,4	—14,86	5117,2	—16,52
14	6006,6	—3,599	10167,6	—12,72	13704,0	—14,77	1564,7	—14,85	5083,9	—16,77
16	5998,8	—4,134	10140,7	—14,17	13672,7	—16,47	1535,1	—14,70	5050,2	—16,88
18	5990,0	—4,657	10111,0	—15,56	13638,2	—18,10	1505,9	—14,45	5016,4	—16,90
20	5980,2	—5,166	10078,6	—16,89	13600,4	—19,67	1477,3	—14,14	4982,6	—16,85
22	5969,4	—5,663	10043,5	—18,16	13559,5	—21,17	1449,4	—13,81	4949,0	—16,77
24	5957,6	—6,149	10006,0	—19,38	13515,7	—22,62	1422,1	—13,47	4915,6	—16,67
26	5944,8	—6,622	9966,0	—20,55	13469,1	—24,00	1395,5	—13,16	4882,4	—16,56
28	5931,1	—7,084	9923,8	—21,66	13419,8	—25,34	1369,5	—12,87	4849,3	—16,46
30	5916,5	—7,535	9879,4	—22,72	13367,8	—26,62	1344,0	—12,59	4816,5	—16,37
32	5900,9	—7,975	9833,0	—23,73	13313,3	—27,85	1319,1	—12,31	4783,9	—16,30
34	5884,6	—8,405	9784,5	—24,69	13256,4	—29,04	1294,8	—12,05	4751,3	—16,25
36	5867,3	—8,824	9734,2	—25,61	13197,2	—30,18	1270,9	—11,80	4718,9	—16,22
38	5849,3	—9,234	9682,1	—26,48	13135,7	—31,28	1247,6	—11,55	4686,4	—16,20
40	5830,4	—9,634	9628,3	—27,31	13072,1	—32,34	1224,7	—11,32	4654,0	—16,21
45	5779,8	—10,60	9486,9	—29,21	12904,1	—34,82	1169,5	—10,77	4572,8	—16,28
50	5724,5	—11,50	9336,6	—30,87	12724,3	—37,09	1116,9	—10,28	4491,1	—16,43
55	5664,8	—12,37	9178,6	—32,33	12533,5	—39,17	1066,7	—9,819	4408,5	—16,62
60	5601,0	—13,18	9013,7	—33,61	12332,9	—41,06	1018,6	—9,399	4324,8	—16,86
65	5533,1	—13,96	8842,8	—34,73	12123,2	—42,81	972,62	—9,008	4239,9	—17,08

T, K	Константан — Cu		Au + 1,9 % Co — Cu		Au+1,9 % Co — хромель		Au + 0,07 % Fe — Cu		Au+0,07% Fe—хромель	
	E, мкВ	*dE/dT*, мкВ/К	*E*, мкВ	*dE/dT*, мкВ/К	*E*, мкВ	*dE/dT*, мкВ/К	*E*, мкВ	*dE/dT*, мкВ/К	*E*, мкВ	*dE/dT*, мкВ/К
70	5461,4	—14,71	8666,6	—35,71	11905,1	—44,41	928,37	—8,630	4153,8	—17,34
75	5386,0	—15,43	8485,9	—36,58	11679,3	—45,87	886,12	—8,273	4066,4	—17,60
30	5307,1	—16,12	8301,0	—37,35	11446,5	—47,23	845,60	—7,939	3977,8	—17,84
85	5224,8	—16,79	8112,5	—38,04	11207,2	—48,47	806,70	—7,624	3888,0	—18,06
90	5139,2	—17,44	7920,7	—38,65	10962,0	—49,62	769,33	—7,328	3797,2	—18,27
95	5050,4	—18,08	7726,1	—39,21	10711,2	—50,67	733,39	—7,048	3705,4	—18,46
100	4958,4	—18,71	7528,8	—39,71	10455,4	—51,65	698,82	—6,783	3612,6	—18,65
110	4765,2	—19,93	7127,2	—40,58	9929,9	—53,40	633,48	—6,293	3424,3	—19,01
120	4559,9	—21,13	6717,7	—41,31	9388,2	—54,91	572,79	—5,851	3232,5	—19,35
130	4342,6	—22,33	6301,3	—41,93	8832,4	—56,22	516,31	—5,452	3037,4	—19,67
140	4113,4	—23,51	5879,3	—42,46	8264,3	—57,39	463,64	—5,090	2839,2	—19,97
150	3872,3	—24,70	5452,5	—42,90	7685,1	—58,43	414,41	—4,762	2638,0	—20,26
160	3619,4	—25,88	5021,6	—43,27	7096,1	—59,36	368,30	—4,464	2434,2	—20,52
170	3354,7	—27,05	4587,2	—43,59	6498,2	—60,21	325,64	—4,193	2227,8	—20,75
180	3078,4	—28,21	4150,0	—43,86	5892,2	—60,97	284,37	—3,944	2019,2	—20,97
190	2790,7	—29,34	3710,1	—44,10	5279,0	—61,66	246,10	—3,713	1808,5	—21,16
200	2491,8	—30,43	3268,1	—44,30	4659,3	—62,27	210,06	—3,497	1596,0	—21,34
210	2182,2	—31,48	2824,3	—44,46	4033,9	—62,80	176,12	—3,293	1381,7	—21,52
220	1862,3	—32,50	2379,1	—44,57	3403,5	—63,26	144,17	—3,099	1165,7	—21,68
230	1532,4	—33,47	1933,0	—44,63	2768,9	—63,65	114,10	—2,918	948,13	—21,83
240	1193,1	—34,41	1486,6	—44,64	2130,9	—63,96	85,76	—2,754	729,14	—21,96
250	844,3	—35,35	1040,2	—44,65	1490,0	—64,20	58,93	—2,619	509,07	—22,04
260	486,1	—36,31	593,3	—44,76	847,2	—64,36	33,24	—2,529	288,58	—22,04
270	117,8	—37,36	143,8	—45,24	203,3	—64,40	8,12	—2,510	68,87	—21,88
273	5.2	—37,70	7,7	—45,51	10,1	—64,38	—	—	3,37	—21,79

Таблица 8.16. **Стандартная градуировочная таблица термопары медь — копель (ГОСТ 22666—77)** [60]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0° С; допускаемые отклонения $\Delta E = \pm (1{,}3 - 1{,}1 \cdot 10^{-3} t)\, dE/dt$, мВ; электроды: медь электролитическая рафинированная чистотой 99,95%, содержащая 0,02—0.07% O_2 и не более 0,01 % других примесей

t, °С	Приращение температуры, °С					*t*, °С	Приращение температуры, °С				
	0	2	4	6	8		0	2	4	6	8
—200	6,154	—	—	—	—	—80	3,065	3,133	3,199	3,266	3,331
—190	5,975	6,012	6,048	6,084	6,119	—70	2,722	2,792	2,861	2,930	2,998
—180	5,781	5,821	5,860	5,899	5,937	—60	2,367	2,439	2,510	2,582	2,652
—170	5,572	5,615	5,657	5,699	5,740	—50	2,000	2,074	2,148	2,222	2,295
—160	5,349	5,394	5,440	5,484	5,529	—40	1,622	1,698	1,774	1,850	1,925
—150	5,111	5,159	5,208	5,255	5,302	—30	1,232	1,311	1,389	1,467	1,545
—140	4,859	4,910	4,961	5,012	5,061	—20	0,832	0,913	0,993	1,074	1,153
—130	4,593	4,647	4,701	4,754	4,807	—10	0,421	0,504	0,587	0,669	0,751
—120	4,313	4,370	4,427	4,483	4,538	0	0,000	0,085	0,170	0,254	0,338
—110	4,021	4,080	4,139	4,198	4,256						
—100	3,715	3,777	3,839	3,900	3,961						
— 90	3,396	3,461	3,525	3,589	3,652						

Примечание. Для аппроксимации зависимости термо-ЭДС *E*, мкВ, от температуры *t*, ° С, в области температур от — 255 до 50° С в [57] предлагается полином $E = \sum_{i=1}^{3} a_i t^i$, где $a_1 = -42{,}65243$ °С$^{-1}$; $a_2 = -4{,}9538 \cdot 10^{-2}$ °С$^{-2}$; $a_3 = 4{,}9 \cdot 10^{-5}$ °С$^{-3}$.

Таблица 8.17. **Градуировочная таблица термопары железо — константан** [60]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0 °С; константан: 55—61 % Cu, 45—39 % Ni с малыми добавками Mn, Fe и с примесями C, Si, Co, Mg; железо: технически чистое безуглеродистое, примеси: 0,02—0,10 % C, не более 0,4 % Mn, не более 0,15 % Cu, от 0,005 до 0,02 % Si, S, Ni, Cr, P

t, °С	Приращение температуры, °С									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—200	— 7,890	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—100	— 4,632	— 5,036	— 5,426	— 5,801	— 6,159	— 6,499	— 6,821	— 7,122	— 7,402	— 7,659
— 0	0,000	— 0,501	— 0,995	— 1,481	— 1,960	— 2,431	— 2,892	— 3,344	— 3,785	— 4,215
0	0,000	0,507	1,019	1,536	2,058	2,585	3,115	3,649	4,186	4,725
100	5,268	5,812	6,359	6,907	7,457	8,008	8,560	9,113	9,667	10,222
200	10,777	11,332	11,887	12,442	12,998	13,533	14,108	14,663	15,217	15,771
300	16,325	16,879	17,432	17,984	18,537	19,089	19,640	20,192	20,743	21,295
400	21,846	22,397	22,949	23,501	24,054	24,607	25,161	25,716	26,272	26,829
500	27,388	27,949	28,511	29,075	29,642	30,210	30,782	31,356	31,933	32,513
600	33,096	33,683	34,273	34,867	35,464	36,066	36,671	37,280	37,893	38,510
700	39,130	39,754	40,382	41,013	41,647	42,283	42,922	43,563	44,207	44,852
800	45,498	46,144	46,790	47,434	48,076	48,716	49,354	49,989	50,621	51,249
900	51,875	52,496	53,115	53,729	54,341	54,948	55,553	56,155	56,753	57,349
1000	57,942	58,533	59,121	55,708	60,293	60,876	61,459	62,039	62,619	63,199
1100	63,777	64,355	64,933	65,510	66,087	66,664	67,240	67,815	68,390	68,964
1200	69,536	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.18. **Градуировочная таблица термопары медь — константан** [60]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0° С; медь: электролитическая рафинированная чистотой 99,95 %, содержащая 0,02—0,07 % O_2 и 0,01 % примесей; константан: 55—61 % Cu, 45—39 % Ni с малыми добавками Mn, Fe и с примесями C, Si, Co, Mg

t, °С	Приращение температуры, °С									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—200	—5,603	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—100	—3,378	—3,656	—3,923	—4,177	—4,419	—4,648	—4,865	—5,069	—5,261	—5,439
—0	0,000	—0,383	—0,757	—1,121	—1,475	—1,819	—2,152	—2,475	—2,788	—3,089
0	0,000	0,391	0,789	1,196	1,611	2,035	2,467	2,908	3,357	3,813
100	4,277	4,749	5,227	5,712	6,204	6,702	7,207	7,718	8,235	8,757
200	9,286	9,820	10,360	10,905	11,456	12,011	12,572	13,137	13,707	14,281
300	14,860	15,443	16,030	16,621	17,217	17,816	18,420	19,027	19,638	20,252
400	20,869	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.19. **Стандартная градуировочная таблица термопары хромель — копель** [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68): температура свободных концов 0° С; предел допускаемых отклонений 0,2 мВ при $t < 300°$ С и $[0.2 + 6{,}0 \cdot 10^{-4}\ (t - 300)]$ мВ при $t > 300°$ С; электроды: хромель НХ 9,5; копель МНМц 43—0,5

t, °С	Приращение температуры, °С									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
— 0	— 0,000	— 0,640	— 1,270	— 1,890	— 2,500	— 3,110	—	—	—	—
0	0,000	0,646	1,303	1,976	2,658	3,350	4,050	4,760	5,469	6,179
100	6,898	7,627	8,366	9,115	9,865	10,624	11,393	12,172	12,961	13,760
200	14,570	15,380	16,200	17,030	17,860	18,690	19,520	20,360	21,200	22,040
300	22,880	23,720	24,560	25,410	26,270	27,130	28,000	28,870	29,740	30,610
400	31,480	32,350	33,230	34,110	34,990	35,870	36,750	37,630	38,510	39,390
500	40,270	41,150	42,030	42,910	43,790	44,670	45,550	46,440	47,330	48,210
600	49,090	49,970	50,850	51,730	52,610	53,480	54,350	55,220	56,090	56,960
700	57,820	58,680	59,540	60,400	61,260	62,120	62,980	63,840	64,700	65,560
800	66,420	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.20. **Стандартная градуировочная таблица термопары хромель — алюмель [58]**

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0° С; предел допускаемых отклонений 0,16 мВ при $t < 300°$ С и $[0{,}16 + 2{,}0 \cdot 10^{-4}\ (t - 300)]$ мВ при $t > 300°$ С; электроды: хромель НХ 9,5; алюмель НМц АК 2—2—1

t, °С	Приращение температуры, °С									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—0	—0,000	—0,392	—0,777	—1,156	—1,527	—1,889	—	—	—	—
0	0,000	0,397	0,798	1,203	1,611	2,022	2,436	2,850	3,266	3,681
100	4,095	4,508	4,919	5,327	5,733	6,137	6,539	6,939	7,338	7,737
200	8,137	8,537	8,938	9,341	9,745	10,151	10,560	10,969	11,381	11,793
300	12,207	12,623	13,039	13,456	13,874	14,292	14,712	15,132	15,552	15,974
400	16,395	16,818	17,241	17,664	18,088	18,513	18,938	19,363	19,788	20,214
500	20,640	21,066	21,493	21,919	22,346	22,772	23,198	23,624	24,050	24,476
600	24,902	25,327	25,751	26,176	26,599	27,022	27,445	27,867	28,288	28,709
700	29,128	29,547	29,965	30,383	30,799	31,214	31,629	32,042	32,455	32,866
800	33,277	33,686	34,095	34,502	34,909	35,314	35,718	36,121	36,524	36,925
900	37,325	37,724	38,122	38,519	38,915	39,310	39,703	40,096	40,488	40,879
1000	41,269	41,657	42,045	42,432	42,817	43,202	43,585	43,968	44,349	44,729
1100	45,108	45,486	45,863	46,238	46,612	46,985	47,356	47,726	48,095	48,462
1200	48,828	49,192	49,555	49,916	50,276	50,633	50,990	51,344	51,697	52,049
1300	52.398	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.21. **Стандартная градуировочная таблица термопары Pt — Pt + 10 % Rh [58]**

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0° С; предел допускаемых отклонений 0,01 мВ при $t < 300°$ С и $[0{,}01 + 2{,}5 \cdot 10^{-5}\ (t - 300)]$ мВ при $t > 300°$ С

t, °С	Приращение температуры, °С					t, °С	Приращение температуры, °С				
	0	2	4	6	8		0	2	4	6	8
0	0,000	0,011	0,022	0,033	0,044	340	2,684	2,702	2,721	2,739	2,758
10	0,056	0,067	0,078	0,090	0,101	350	2,777	2,795	2,814	2,833	2,852
20	0,113	0,125	0,137	0,149	0,161	360	2,871	2,889	2,908	2,927	2,946
30	0,173	0,185	0,197	0,209	0,221	370	2,965	2,984	3,003	3,022	3,041
40	0,234	0,247	0,259	0,272	0,285	380	3,060	3,079	3,098	3,117	3,136
50	0,297	0,310	0,324	0,337	0,350	390	3,155	3,174	3,193	3,212	3,231
60	0,363	0,377	0,390	0,404	0,418	400	3,250	3,269	3,288	3,307	3,326
70	0,431	0,445	0,459	0,473	0,487	410	3,345	3,364	3,383	3,402	3,421
80	0,501	0,515	0,529	0,543	0,557	420	3,440	3,459	3,478	3,498	3,517
90	0,572	0,586	0,601	0,615	0,629	430	3,536	3,555	3,574	3,594	3,613
100	0,644	0,658	0,673	0,688	0,702	440	3,632	3,651	3,670	3,690	3,709
110	0,717	0,732	0,747	0,762	0,777	450	3,728	3,748	3,767	3,787	3,806
120	0,792	0,807	0,822	0,838	0,853	460	3,825	3,844	3,864	3,883	3,902
130	0,869	0,884	0,900	0,916	0,931	470	3,922	3,942	3,961	3,981	4,000
140	0,947	0,962	0,978	0,994	1,010	480	4,020	4,040	4,059	4,079	4,098
150	1,026	1,042	1,058	1,074	1,090	490	4,118	4,138	4,157	4,177	4,196
160	1,106	1,122	1,138	1,154	1,171	500	4,216	4,236	4,256	4,275	4,295
170	1,187	1,203	1,220	1,236	1,253	510	4,315	4,335	4,355	4,374	4,394
180	1,269	1,286	1,302	1,319	1,336	520	4,414	4,434	4,454	4,474	4,494
190	1,352	1,369	1,386	1,402	1,419	530	4,514	4,534	4,554	4,574	4,594
200	1,436	1,453	1,470	1,487	1,504	540	4,614	4,634	4,654	4,674	4,694
210	1,521	1,538	1,555	1,572	1,589	550	4,714	4,734	4,754	4,774	4,794
220	1,606	1,623	1,640	1,658	1,675	560	4,814	4,834	4,854	4,874	4,894
230	1,692	1,710	1,727	1,744	1,762	570	4,914	4,934	4,955	4,975	4,995
240	1,779	1,797	1,814	1,832	1,850	580	5,015	5,035	5,055	5,076	5,096
250	1,867	1,885	1,902	1,920	1,938	590	5,116	5,136	5,156	5,176	5,197
260	1,955	1,973	1,990	2,008	2,026	600	5,218	5,238	5,259	5,279	5,300
270	2,043	2,061	2,079	2,097	2,115	610	5,320	5,340	5,361	5,381	5,402
280	2,133	2,151	2,169	2,187	2,205	620	5,422	5,442	5,463	5,484	5,504
290	2,223	2,241	2,259	2,277	2,295	630	5,525	5,546	5,566	5,587	5,608
300	2,314	2,332	2,350	2,369	2,387	640	5,628	5,649	5,669	5,690	5,711
310	2,406	2,424	2,442	2,461	2,479	650	5,731	5,752	5,773	5,793	5,814
320	2,498	2,516	2,535	2,553	2,572	660	5,835	5,856	5,876	5,897	5,918
330	2,591	2,609	2,628	2,646	2,665	670	5,939	5,960	5,981	6,001	6,022

t, °C	Приращение температуры, °C					t, °C	Приращение температуры, °C				
	0	2	4	6	8		0	2	4	6	8
680	6,043	6,064	6,085	6,106	6,127	1150	11,306	11,330	11,354	11,378	11,401
690	6,148	6,169	6,190	6,211	6,232	1160	11,425	11,449	11,473	11,497	11,520
700	6,253	6,274	6,295	6,316	6,337	1170	11,544	11,568	11,592	11,616	11,640
710	6,358	6,379	6,400	6,421	6,442	1180	11,664	11,688	11,712	11,736	11,760
720	6,463	6,484	6,505	6,526	6,547	1190	11,784	11,808	11,832	11,856	11,880
730	6,568	6,589	6,610	6,632	6,653	1200	11,904	11,928	11,952	11,976	12,000
740	6,674	6,695	6,717	6,738	6,759	1210	12,024	12,048	12,072	12,096	12,120
750	6,780	6,802	6,823	6,844	6,866	1220	12,144	12,168	12,192	12,216	12,240
760	6,887	6,909	6,930	6,951	6,973	1230	12,264	12,288	12,312	12,336	12,360
770	6,994	7,016	7,037	7,058	7,080	1240	12,384	12,408	12,432	12,456	12,480
780	7,101	7,123	7,144	7,166	7,188	1250	12,504	12,528	12,552	12,576	12,600
790	7,209	7,231	7,252	7,274	7,296	1260	12,624	12,648	12,672	12,696	12,720
800	7,317	7,339	7,361	7,383	7,405	1270	12,744	12,768	12,792	12,816	12,840
810	7,426	7,448	7,470	7,492	7,514	1280	12,865	12,889	12,913	12,937	12,961
820	7,535	7,557	7,579	7,601	7,623	1290	12,986	13,010	13,034	13,058	13,082
830	7,645	7,667	7,689	7,711	7,733	1300	13,107	13,131	13,155	13,179	13,203
840	7,754	7,776	7,798	7,820	7,842	1310	13,228	13,252	13,276	13,300	13,324
850	7,864	7,886	7,908	7,930	7,952	1320	13,349	13,373	13,397	13,421	13,445
860	7,974	7,996	8,018	8,040	8,062	1330	13,470	13,494	13,518	13,542	13,566
870	8,084	8,106	8,128	8,150	8,172	1340	13,591	13,615	13,639	13,663	13,687
880	8,194	8,216	8,238	8,260	8,282	1350	13,712	13,736	13,760	13,784	13,808
890	8,305	8,327	8,349	8,371	8,393	1360	13,833	13,857	13,881	13,905	13,929
900	8,416	8,438	8,460	8,482	8,504	1370	13,954	13,978	14,002	14,026	14,050
910	8,527	8,549	8,571	8,594	8,616	1380	14,075	14,099	14,123	14,147	14,171
920	8,639	8,661	8,683	8,706	8,728	1390	14,195	14,219	14,243	14,267	14,291
930	8,751	8,773	8,796	8,818	8,841	1400	14,315	14,339	14,363	14,387	14,411
940	8,864	8,887	8,909	8,932	8,955	1410	14,435	14,459	14,483	14,507	14,531
950	8,978	9,001	9,023	9,046	9,069	1420	14,554	14,578	14,602	14,626	14,650
960	9,092	9,115	9,137	9,160	9,183	1430	14,674	14,698	14,722	14,746	14,770
970	9,206	9,229	9,251	9,274	9,297	1440	14,794	14,818	14,842	14,866	14,890
980	9,320	9,343	9,366	9,389	9,412	1450	14,914	14,938	14,962	14,986	15,010
990	9,435	9,458	9,481	9,504	9,527	1460	15,034	15,058	15,082	15,106	15,130
1000	9,550	9,573	9,596	9,619	9,642	1470	15,154	15,178	15,202	15,226	15,250
1010	9,665	9,688	9,711	9,734	9,757	1480	15,273	15,297	15,321	15,345	15,369
1020	9,780	9,803	9,826	9,849	9,872	1490	15,392	15,416	15,440	15,464	15,487
1030	9,895	9,918	9,941	9,965	9,988	1500	15,511	15,535	15,559	15,583	15,607
1040	10,011	10,036	10,058	10,081	10,105	1510	15,630	15,654	15,678	15,702	15,726
1050	10,128	10,152	10,175	10,198	10,222	1520	15,749	15,773	15,796	15,820	15,844
1060	10,245	10,269	10,292	10,315	10,339	1530	15,867	15,891	15,914	15,938	15,962
1070	10,362	10,385	10,409	10,432	10,455	1540	15,985	16,009	16,032	16,055	16,079
1080	10,479	10,502	10,526	10,549	10,572	1550	16,102	16,126	16,149	16,172	16,196
1090	10,596	10,620	10,643	10,667	10,690	1560	16,219	16,243	16,266	16,289	16,313
1100	10,714	10,738	10,761	10,785	10,808	1570	16,336	16,360	16,383	16,406	16,430
1110	10,832	10,856	10,879	10,903	10,926	1580	16,453	16,476	16,500	16,523	16,546
1120	10,950	10,974	10,997	11,021	11,044	1590	16,569	16,593	16,616	16,639	16,662
1130	11,068	11,092	10,116	11,140	11,163	1600	16,685	—	—	—	—
1140	11,187	11,211	11,235	11,259	11,282						

Таблица 8.22. **Стандартная градуировочная таблица термопары** Pt + 6 % Rh — Pt + 30 % Rh [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0° С; предел допускаемых отклонений 0,01 мВ при $t < 300°$ С и $[0{,}01 + 3{,}3 \cdot 10^{-5}\ (t - 300)]$ мВ при $t > 300°$ С

t, °C	Приращение температуры, °C									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
300	0,443	0,459	0,475	0,491	0,508	0,525	0,542	0,559	0,577	0,595
350	0,613	0,632	0,650	0,669	0,688	0,707	0,727	0,747	0,767	0,787
400	0,808	0,829	0,850	0,871	0,893	0,915	0,938	0,960	0,983	1,006
450	1,029	1,053	1,076	1,100	1,124	1,148	1,173	1,198	1,223	1,248
500	1,274	1,299	1,325	1,351	1,377	1,403	1,430	1,457	1,484	1,512

t, °C	Приращение температуры, °C									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
550	1,540	1,568	1,596	1,625	1,653	1,682	1,710	1,740	1,770	1,800
600	1,830	1,860	1,891	1,922	1,953	1,984	2,015	2,046	2,078	2,110
650	2,142	2,174	2,207	2,239	2,272	2,305	2,339	2,373	2,407	2,441
700	2,476	2,511	2,546	2,581	2,616	2,651	2,687	2,723	2,759	2,795
750	2,832	2,868	2,906	2,943	2,981	3,019	3,057	3,095	3,132	3,170
800	3,208	3,247	3,287	3,327	3,367	3,407	3,447	3,487	3,527	3,567
850	3,608	3,649	3,690	3,731	3,773	3,815	3,856	3,898	3,940	3,982
900	4,025	4,068	4,111	4,155	4,198	4,241	4,285	4,329	4,373	4,417
950	4,462	4,507	4,552	4,597	4,642	4,687	4,732	4,778	4,824	4,870
1000	4,916	4,962	5,009	5,055	5,102	5,149	5,196	5,243	5,291	5,339
1050	5,387	5,436	5,484	5,533	5,582	5,631	5,680	5,729	5,778	5,828
1100	5,878	5,928	5,978	6,028	6,078	6,129	6,180	6,231	6,282	6,333
1150	6,384	6,435	6,487	6,538	6,590	6,642	6,694	6,747	6,799	6,852
1200	6,904	6,957	7,010	7,064	7,117	7,170	7,224	7,277	7,331	7,385
1250	7,439	7,493	7,547	7,601	7,655	7,709	7,764	7,819	7,873	7,928
1300	7,982	8,037	8,092	8,147	8,203	8,259	8,315	8,371	8,427	8,483
1350	8,539	8,595	8,652	8,708	8,765	8,822	8,878	8,935	8,992	9,048
1400	9,106	9,162	9,220	9,276	9,334	9,390	9,448	9,505	9,563	9,621
1450	9,679	9,737	9,795	9,853	9,911	9,969	10,027	10,085	10,143	10,201
1500	10,259	10,318	10,376	10,434	10,493	10,551	10,610	10,668	10,727	10,785
1550	10,844	10,902	10,961	11,019	11,078	11,136	11,195	11,253	11,312	11,370
1600	11,429	11,487	11,546	11,604	11,663	11,721	11,780	11,838	11,897	11,955
1650	12,014	12,072	12,131	12,190	12,249	12,308	12,367	12,426	12,485	12,544
1700	12,603	12,662	12,721	12,780	12,839	12,898	12,957	13,016	13,075	13,134
1750	13,193	13,252	13,310	13,369	13,427	13,486	13,544	13,603	13,661	13,720
1800	13,778	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.23. Стандартная градуировочная таблица термопары W + 5 % Re — W + 20 % Re [58] (градуировочная характеристика *)

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0° С; предел допускаемых отклонений 0,08 мВ при $t < 1000$° С и $[0{,}08 + 4{,}0 \cdot 10^{-5} (t - 1000)]$ мВ при $t > 1000$° С

t, ° С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,000	0,124	0,250	0,378	0,508	0,640	0,774	0,910	1,048	1,188
100	1,330	1,475	1,622	1,771	1,922	2,075	2,230	2,387	2,546	2,707
200	2,869	3,032	3,195	3,359	3,523	3,688	3,853	4,019	4,185	4,352
300	4,519	4,687	4,855	5,024	5,193	5,362	5,531	5,700	5,869	6,039
400	6,209	6,379	6,549	6,719	6,889	7,059	7,229	7,399	7,569	7,739
500	7,909	8,078	8,247	8,416	8,585	8,754	8,923	9,092	9,261	9,430
600	9,598	9,765	9,933	10,101	10,269	10,437	10,605	10,772	10,939	11,106
700	11,273	11,440	11,606	11,772	11,938	12,104	12,269	12,434	12,599	12,764
800	12,929	13,093	13,257	13,421	13,584	13,747	13,910	14,072	14,234	14,395
900	14,556	14,716	14,876	15,035	15,194	15,352	15,510	15,667	15,824	15,980
1000	16,136	16,291	16,446	16,600	16,754	16,907	17,060	17,212	17,364	17,515
1100	17,666	17,816	17,966	18,115	18,264	18,412	18,560	18,707	18,854	19,000
1200	19,146	19,291	19,436	19,580	19,724	19,867	20,010	20,152	20,294	20,435
1300	20,576	20,716	20,856	20,996	21,135	21,274	21,413	21,551	21,689	21,826
1400	21,963	22,099	22,235	22,370	22,505	22,639	22,773	22,906	23,039	23,171
1500	23,303	23,434	23,565	23,695	23,825	23,954	24,083	24,211	24,338	24,464
1600	24,590	24,715	24,840	24,964	25,088	25,211	25,334	25,456	25,578	25,699
1700	25,820	25,940	26,060	26,179	26,298	26,416	26,534	26,651	26,768	26,884
1800	26,999	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* В [58] приведены также градуировочные характеристики 2 и 3, незначительно отличающиеся от характеристики 1.

Таблица 8.24. **Градуировочная таблица термопары W + 5 % Re — W + 20 % Re для диапазона температур от 1800 до 2500° С** [58]

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С (МПТШ—68); температура свободных концов 0° С

t, °С	Приращение температуры, °С									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
1800	26,999	27,113	27,226	27,339	27,451	27,563	27,675	27,786	27,897	28,007
1900	28,117	28,226	28,334	28,442	28,549	28,656	28,762	28,867	28,971	29,074
2000	29,177	29,279	29,381	29,483	29,584	29,685	29,786	29,886	29,986	30,086
2100	30,185	30,284	30,382	30,479	30,575	30,670	30,765	30,859	30,952	31,044
2200	31,136	31,227	31,318	31,408	31,498	31,587	31,676	31,764	31,852	31,939
2300	32,026	32,112	32,197	32,281	32,365	32,448	32,531	32,613	32,695	32,776
2400	32,857	32,937	33,017	33,096	33,175	33,253	33,331	33,408	33,485	33,561
2500	33,636	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.25. **Градуировочная таблица термо-ЭДС некоторых высокотемпературных термопар**

Термо-ЭДС, мВ; температура, °С; температура свободных концов термопар 0° С: нихросил: Ni, 14,2 % Cr, 1,4 % Si; нисил: Si, 4,4 % Si, 0,1% Mg

t, °С	Никель — нихром [50]	Нихросил — нисил [10]	Ir — Ir + 10% Ru [59]	Ir+10% Ru — Ir+10% Rh [59]	Ir—Ir+60%Rh [26]	W—Mo [50]	*t*, °С	Никель — нихром [50]	Нихросил — нисил [10]	Ir — Ir + 10% Ru [59]	Ir+10%Ru — Ir+ 10% Rh [59]	Ir—Ir+60%Rh [26]	W—Mo [50]
100	3,7	2,77	—	—	0,37	0,4	1100	40,6	40,08	2,73	6,83	5,85	—
200	7,8	5,91	—	—	0,82	—	1200	—	43,84	3,00	7,38	6,39	—
300	11,8	9,34	—	1,66	1,33	—	1300	—	47,50	3,24	7,91	6,92	—0,285
400	15,1	12,97	—	—	1,89	—	1400	—	—	3,47	8,41	7,46	+0,299
500	18,4	16,74	—	—	2,46	—	1500	—	—	3,68	8,89	8,01	0,937
600	21,9	20,61	—	3,64	3,05	—	1600	—	—	3,87	9,35	8,58	1,63
700	25,5	24,53	—	—	3,63	—	1700	—	—	4,09	9,81	9,16	2,38
800	29,2	28,46	—	—	4,20	—	1800	—	—	4,19	10,26	9,75	3,14
900	33,0	32,37	—	—	4,76	—	2000	—	—	6,5*	—	11,00	—
1000	36,7	36,25	2,45	6,24	5,31	—							

* Термо-ЭДС при температуре 2300° С.

8.6. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Действие конденсационных термометров основано на температурной зависимости давления насыщенных паров жидкости. Термометрические вещества — обычно жидкие газы: гелий, водород, неон, аргон, кислород и др. Для определения температуры по измеренному давлению пользуются таблицами или эмпирическими формулами. Диапазон измерения температуры конденсационными термометрами ограничен снизу температурой затвердевания термометрической жидкости, а сверху — температурой критической точки. Высокоточные термометры позволяют измерять температуру с погрешностью не больше 0,001 К.

Обычно давление паров определяют по показаниям ртутного манометра. При этом отсчеты давления по высоте столба ртути зависят от местного ускорения свободного падения и температуры ртути. В случае прецизионных измерений вводят поправки к барометрической высоте h, м:

гравитационная поправка

$$\Delta h = \frac{g - 9{,}80665}{9{,}80665}\, h;$$

температурная поправка

$$\Delta h = -\alpha \Delta t h,$$

где g — значение местного ускорения свободного падения, м/с^2; Δt — разность между температурой ртути и температурой, указанной в табл. 8.27—8.34, °С; α — коэффициент, который для ртутного манометра со стеклянной шкалой равен $1{,}72 \cdot 10^{-4}$ °С$^{-1}$ и для манометра с латунной шкалой $1{,}63 \cdot 10^{-4}$ °С$^{-1}$ [47].

Вопросы термометрии по давлению паров жидкостей рассмотрены в [47, 61]. Важная для низкотемпературной термометрии методика измерения давления паров гелия обсуждается в [48, 62, 63].

Таблица 8.26. **Рабочие интервалы некоторых конденсационных термометров**

ТЖ	^{3}He	^{4}He	e—H_2	n—H_2	Ne	N_2	O_2	CF_4
T, К	0,2—3,316	0,5—5,195	13.81—23	13.96—30	24,56—40	63—84	54,4—94	90—173

Примечание. ТЖ — термометрическая жидкость; e — H_2 — равновесный водород; n — H_2 — нормальный водород (определение см. в прнмечаннях к табл. 8.1 и 8.4).

Таблица 8.27. **Зависимость между давлением насыщенных паров ^{3}He и температурой T_{76}**

T, К	Приращение температуры, К									
	0,00	0.01	0.02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Давление, Па									
0,2	0,00147	0,00298	0,00569	0,01030	0,01783	0,02964	0,04754	0,07385	0,11150	0,16406
0,3	0,2358	0,3320	0,4584	0,6220	0,8305	1,0928	1,4186	1,8187	2,3050	2,8902
0,4	3,588	4,414	5,383	6,512	7,820	9,324	11,045	13,002	15,217	17,712
0,5	20,510	23,633	27,106	30,955	35,203	39,877	45,003	50,608	56,718	63,363
0,6	70,569	78,365	86,780	95,842	105,581	116,025	127,205	139,150	151,891	165,456
0,7	179,88	195,18	211,40	228,57	246,72	265,87	286,05	307,31	329,66	353,15
0,8	377,79	403,62	430,67	458,97	488,55	519,44	551,67	585,27	620,27	656,70
0,9	694,59	733,98	774,88	817,32	861,35	906,98	954,25	1003,19	1053,82	1106,17
	Давление, 10^3 Па									
1,0	1,160	1,216	1,274	1,333	1,395	1,458	1,523	1,590	1,660	1,731
1,1	1,804	1,879	1,957	2,036	2,118	2,201	2,287	2,376	2,466	2,559
1,2	2,654	2,751	2,851	2,953	3,058	3,165	3,274	3,386	3,501	3,618
1,3	3,737	3,860	3,984	4,112	4,242	4,375	4,510	4,649	4,790	4,934
1,4	5,081	5,230	5,383	5,538	5,696	5,858	6,022	6,189	6,360	6,533
1,5	6,709	6,889	7,072	7,258	7,447	7,639	7,834	8,033	8,235	8,440
1,6	8,649	8,861	9,076	9,295	9,517	9,743	9,972	10,205	10,441	10,681
1,7	10,924	11,171	11,421	11,675	11,933	12,195	12,460	12,729	13,001	13,278
1,8	13,558	13,842	14,130	14,422	14,718	15,017	15,321	15,628	15,940	16,256
1,9	16,575	16,899	17,227	17,559	17,895	18,235	18,579	18,928	19,280	19,637
2,0	19,999	20,364	20,734	21,108	21,487	21,870	22,257	22,649	23,046	23,446
2,1	23,852	24,261	24,676	25,095	25,518	25,946	26,379	26,816	27,259	27,705
2,2	28,157	28,613	29,074	29,540	30,011	30,486	30,967	31,452	31,942	32,438
2,3	32,938	33,443	33,953	34,468	34,988	35,514	36,044	36,580	37,120	37,666
2,4	38,217	38,774	39,335	39,902	40,474	41,052	41,635	42,223	42,816	43,415
2,5	44,020	44,630	45,245	45,866	46,493	47,125	47,763	48,406	49,055	49,710
2,6	50,370	51,037	51,709	52,386	53,070	53,759	54,455	55,156	55,863	56,576
2,7	57,295	58,021	58,752	59,489	60,233	60,982	61,738	62,500	63,268	64,043
2,8	64,824	65,611	66,405	67,205	68,011	68,824	69,644	70,470	71,302	72,141
2,9	72,987	73,840	74,699	75,565	76,438	77,318	78,205	79,098	79,999	80,907
3,0	81,821	82,743	83,672	84,608	85,551	86,502	87,460	88,425	89,398	90,378
3,1	91,366	92,361	93,364	94,375	95,393	96,419	97,453	98,495	99,544	100,602
3,2	101,67	102,74	103,82	104,91	106,01	107,12	108,23	109,36	110,49	111,63
3,3	112,78	113,94								

Зависнмость между давлением p, Па, насыщенных паров ^{3}He и T_{76}, К, в области от 0,5 до 3,3162 К описывается уравнением [23]

$$\ln p = \sum_{k=-1}^{4} a_k T_{76}^k + b \ln T_{76},$$

Это уравнение справедливо в области от 0,5 до 0,2 К прн замене T_{76} на T; $a_{-1} = -2{,}50943$ К; $a_0 = 9{,}70876$; $a_1 = -0{,}304433$ К$^{-1}$; $a_2 = 0{,}210429$ К$^{-2}$; $a_3 = -0{,}0545145$ К$^{-3}$; $a_4 = 0{,}0056067$ К$^{-4}$; $b = 2{,}25484$.

Таблица 8.28. **Зависимость между давлением насыщенных паров ^{4}He и температурой T_{76}**

T, К	Приращение температуры, К									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Давление, Па									
0,5	0,00206	0,00287	0,00396	0,00539	0,00726	0,00969	0,01280	0,01676	0,02176	0,02803
0,6	0,0358	0,0454	0,0573	0,0716	0,0891	0,1101	0,1353	0,1653	0,2009	0,2429
0,7	0,2922	0,3500	0,4172	0,4952	0,5854	0,6892	0,8082	0,9444	1,0995	1,2757
0,8	1,475	1,700	1,954	2,239	2,558	2,914	3,310	3,751	4,240	4,782
0,9	5,379	6,038	6,762	7,556	8,427	9,379	10,418	11,550	12,781	14,119
1,0	15,570	17,140	18,839	20,672	22,649	24,777	27,066	29,523	32,159	34,983
1,1	38,005	41,234	44,682	48,359	52,276	56,445	60,877	65,585	70,580	75,875
1,2	81,483	87,418	93,693	100,322	107,318	114,698	122,474	130,663	139,279	148,339
1,3	157,86	167,85	178,34	189,33	200,85	212,92	225,54	238,74	252,54	266,96
1,4	282,00	297,70	314,07	331,13	348,90	367,40	386,65	406,67	427,48	449,10
1,5	471,54	494,84	519,02	544,08	570,06	596,98	624,85	653,71	683,56	714,44
1,6	746,36	779,35	813,43	848,62	884,95	922,43	961,08	1000,94	1042,02	1084,35
	Давление, 10^3 Па									
1,7	1,128	1,173	1,219	1,267	1,315	1,366	1,417	1,470	1,525	1,581
1,8	1,638	1,697	1,758	1,820	1,884	1,949	2,016	2,084	2,154	2,226
1,9	2,299	2,374	2,451	2,530	2,610	2,692	2,776	2,862	2,949	3,038
2,0	3,129	3,222	3,317	3,413	3,512	3,612	3,714	3,818	3,924	4,031
2,1	4,141	4,252	4,365	4,480	4,597	4,715	4,836	4,958	5,082	5,207
2,2	5,335	5,465	5,597	5,731	5,867	6,006	6,146	6,289	6,434	6,581
2,3	6,730	6,882	7,036	7,192	7,351	7,512	7,676	7,842	8,010	8,181
2,4	8,354	8,530	8,708	8,889	9,072	9,258	9,447	9,638	9,832	10,029
2,5	10,228	10,430	10,634	10,842	11,052	11,265	11,481	11,699	11,921	12,145
2,6	12,372	12,602	12,835	13,071	13,310	13,552	13,797	14,045	14,296	14,550
2,7	14,807	15,067	15,330	15,597	15,867	16,139	16,415	16,695	16,977	17,263
2,8	17,552	17,844	18,140	18,438	18,741	19,046	19,355	19,668	19,984	20,303
2,9	20,625	20,952	21,281	21,615	21,951	22,292	22,635	22,983	23,334	23,689
3,0	24,047	24,409	24,775	25,144	25,517	25,894	26,275	26,659	27,048	27,440
3,1	27,835	28,235	28,639	29,046	29,458	29,873	30,293	30,716	31,143	31,575
3,2	32,010	32,449	32,893	33,340	33,792	34,248	34,708	35,172	35,640	36,113
3,3	36,590	37,071	37,556	38,046	38,540	39,038	39,541	40,047	40,559	41,075
3,4	41,595	42,119	42,648	43,182	43,720	44,262	44,810	45,361	45,917	46,478
3,5	47,044	47,614	48,189	48,768	49,352	49,941	50,534	51,133	51,736	52,344
3,6	52,956	53,574	54,196	54,823	55,455	56,092	56,734	57,381	58,033	58,689
3,7	59,351	60,018	60,690	61,367	62,048	62,735	63,427	64,125	64,827	65,535
3,8	66,247	66,965	67,688	68,417	69,150	69,889	70,634	71,383	72,138	72,898
3,9	73,664	74,435	75,211	75,993	76,780	77,573	78,371	79,175	79,984	80,799
4,0	81,620	82,446	83,277	84,115	84,958	85,806	86,661	87,521	88,387	89,258
4,1	90,136	91,019	91,908	92,803	93,704	94,610	95,523	96,442	97,366	98,297
4,2	99,233	100,176	101,125	102,080	103,040	104,008	104,981	105,960	106,946	107,938
4,3	108,94	109,94	110,95	111,97	112,99	114,02	115,06	116,10	117,15	118,21
4,4	119,27	120,34	121,41	122,50	123,58	124,68	125,78	126,89	128,01	129,13
4,5	130,26	131,39	132,54	133,69	134,84	136,01	137,18	138,36	139,54	140,73
4,6	141,93	143,14	144,35	145,57	146,80	148,03	149,27	150,52	151,78	153,04
4,7	154,31	155,59	156,88	158,17	159,47	160,78	162,09	163,41	164,75	166,08
4,8	167,43	168,78	170,14	171,51	172,89	174,27	175,67	177,07	178,47	179,89
4,9	181,31	182,74	184,18	185,63	187,09	188,55	190,03	191,51	193,00	194,50
5,0	196,00	197,52	199,04	200,58	202,12	203,67	205,24	206,81	208,39	209,98
5,1	211,58	213,20	214,82	216,45	218,10	219,76	221,43	223,12	224,82	226,54

Зависимость между давлением p, Па, насыщенных паров ^{4}He и T_{76}, К, в области от 0,5 до 2,1768 К (λ-точка) описывается уравнением [23]

$$\ln p = \sum_{k=-1}^{6} a_k T_{76}^k ,$$

где $a_{-1} = -7{,}41816$; $a_0 = 5{,}42128$; $a_1 = 9{,}903203$ К$^{-1}$; $a_2 = -9{,}617095$ К$^{-2}$; $a_3 = 6{,}804602$ К$^{-3}$; $a_4 = -3{,}0154606$ К$^{-4}$; $a_5 = 0{,}7461357$ К$^{-5}$; $a_6 = -0{,}0791791$ К$^{-6}$.

В области от 2,1768 К до критической температуры $T_{кр} = 5{,}1953$ К

$$\ln p = \sum_{k=-1}^{8} a_k (T_{76}/T_{кр})^k + b\,(1 - T_{76}/T_{кр})^{1,9} ,$$

где $a_{-1} = -30{,}93285$; $a_0 = 392{,}47361$; $a_1 = -2328{,}04587$; $a_2 = 8111{,}30347$; $a_3 = -17809{,}80901$; $a_4 = 25766{,}52747$; $a_5 = -24601{,}4$; $a_6 = 14944{,}65142$; $a_7 = -5240{,}36518$; $a_8 = 807{,}93168$; $b = 14{,}53333$.

Таблица 8.29. **Зависимость между давлением насыщенных паров, равновесного водорода (10^3 Па) и T_{68}***

T, К	Приращение температуры, К				
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
14,0	7,842	8,773	9,787	10,888	12,082
15,0	13,373	14,765	16,266	17,879	19,609
16,0	21,463	23,446	25,562	27,818	30,220
17,0	32,772	35,481	38,352	41,392	44,606
18,0	48,000	51,580	55,351	59,321	63,495
19,0	67,879	72,480	77,303	82,355	87,641
20,0	93,169	98,945	104,974	111,263	117,819
21,0	124,65	131,75	139,15	146,83	154,82
22,0	163,11	171,71	180,62	189,87	199,44
23,0	209,35	—	—	—	—

* Уравнение, описывающее эту зависимость, см. в табл. 8.4.

Таблица 8.30. **Зависимость между давлением насыщенных паров нормального водорода (10^3 Па) и T_{68}***

T, К	Приращение температуры, К				
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
14,0	7,384	8,271	9,238	10,289	11,430
15,0	12,665	13,999	15,437	16,984	18,646
16,0	20,428	22,335	24,373	26.546	28,862
17,0	31,325	33,940	36,715	39,654	42,763
18,0	46,049	49,517	53,173	57,023	61,073
19,0	65,330	69,798	74,486	79,397	84,540
20,0	89,920	95,543	101,415	107,543	113,934
21,0	120,59	127,53	134,74	142,24	150,04
22,0	158,14	166,54	175,26	184,29	193,66
23,0	203,35	213,39	223,17	234,50	245,59
24,0	257,05	268,88	281,09	293,68	306,67
25,0	320,05	333,84	348,05	362,67	377,72
26,0	393,20	409,12	425,49	442,31	459,59
27,0	477,33	495,55	514,25	533,44	553,13
28,0	573,31	594,01	615,22	636,96	659,22
29,0	682,02	705,37	729,27	753,72	778,75
30,0	804,35	—	—	—	—

* Уравнение, описывающее эту зависимость, см. в табл. 8.4.

Таблица 8.31. **Зависимость между давлением насыщенных паров неона (10^3 Па) и T_{68}***

T, К	Приращение температуры, К				
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
24,0	—	—	—	44,022	47,356
25,0	50,882	54,605	58,534	62,676	67,037
26,0	71,626	76,449	81,515	86,831	92,404
27,0	98,243	104,355	110,747	117.429	124,408
28,0	131,69	139,29	147,21	155,45	164,04
29,0	172,97	182,25	191,89	201,91	212,31
30,0	223,09	234,27	245,85	257,84	270,26
31,0	283,11	296,40	310,13	324,32	338,98
32,0	354,11	369,72	385,82	402,43	419,54
33,0	437,18	455,34	474,05	493,30	513,10
34,0	533,47	554,42	575,95	598,08	620,82
35,0	644,16	668,14	692,75	718,00	743,91
36,0	770,48	797,74	825,67	854,31	883,66
37,0	913,73	944,52	976,07	1008,36	1041,42
38,0	1075,26	1109,89	1145,33	1181,57	1218,65
39,0	1256,56	1295,33	1334,96	1375,47	1416,88
40,0	1459,19	—	—	—	—

* Уравнение, описывающее эту зависимость, см. в табл. 8.4.

Таблица 8.32. **Зависимость между давлением насыщенных паров азота и T_{68}***

T, К	Приращение температуры, К				
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8
	Давление, Па				
45,0	66,408	71,987	77,979	84,411	91,310
46,0	98,705	106,627	115,109	124,183	133,887
47,0	144,26	155,33	167,15	179,76	193,20
48,0	207,52	222,77	239,00	256,27	274,62
49,0	294,13	314,84	336,83	360,16	384,89
50,0	411,11	438,88	468,29	499,40	532,32
51,0	567,12	603,90	642,75	683,77	727,05
52,0	772,72	820,87	871,61	925,07	981,37
	Давление, 10^3 Па				
53,0	1,041	1,103	1,169	1,237	1,310
54,0	1,386	1,466	1,550	1,638	1,730
55,0	1,827	1,928	2,035	2,146	2,263
56,0	2,385	2,512	2,646	2,785	2,931
57,0	3,083	3,243	3,409	3,582	3,763
58,0	3,952	4,149	4,354	4,568	4,790
59,0	5,022	5,264	5,515	5,777	6,049
60,0	6,332	6,627	6,932	7,250	7,580
61,0	7,923	8,279	8,649	9,032	9,430
62,0	9,843	10,270	10,714	11,173	11,650
63,0	12,143	12,651	13,123	13,609	14,109
64,0	14,624	15,154	15,699	16,260	16,838
65,0	17,431	18,041	18,668	19,312	19,975
66,0	20,655	21,353	22,070	22,807	23,562
67,0	24,338	25,134	25,950	26,787	27,646
68,0	28,526	29,428	30,353	31,300	32,271
69,0	33,265	34,284	35,326	36,394	37,487
70,0	38,605	39,750	40,921	42,118	43,344
71,0	44,596	45,877	47,187	48,525	49,893
72,0	51,291	52,719	54,178	55,669	57,190
73,0	58,744	60,331	61,950	63,603	65,290
74,0	67,012	68,768	70,559	72,386	74,250
75,0	76,150	78,088	80,063	82,076	84,129
76,0	86,220	88,351	90,522	92,733	94,986
77,0	97,280	99,616	101,995	104,417	106,883
78,0	109,39	111,95	114,55	117,19	119,88
79,0	122,62	125,41	128,24	131,12	134,05
80,0	137,03	140,06	143,14	146,27	149,45
81,0	152,68	155,97	159,31	162,70	166,15
82,0	169,65	173,20	176,82	180,48	184,21
83,0	187,99	191,83	195,73	199,69	203,70
84,0	207,78	—	—	—	—

* Уравнение, описывающее эту зависимость в области от 63,146 до 84 К, см. в табл. 8.4. В области от 45 до 63 К давление p, Па, связано с температурой T_{68}, К, уравнением [65]

$$\ln p = 22{,}426208 - 820{,}3673/\ T_{68}.$$

Таблица 8.33. **Зависимость между давлением насыщенных паров кислорода и T_{68}***

T, К	Приращение температуры, К				
	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6
	Давление, Па				
54,0	—	148,36	168,15	190,19	214,72
56,0	241,95	272,13	305,53	342,42	383,11
58,0	427,91	477,16	531,23	590,48	655,34
60,0	726,21	803,56	887,85	979,59	1079,30
	Давление, 10^3 Па				
62,0	1,188	1,305	1,432	1,569	1,718
64,0	1,878	2,051	2,236	2,436	2,651
66,0	2,881	3,128	3,392	3,675	3,977
68,0	4,300	4,644	5,011	5,402	5,818
70,0	6,259	6,729	7,226	7,754	8,314
72,0	8,906	9,532	10,194	10,893	11,631
74,0	12,409	13,229	14,093	15,002	15,958
76,0	16,964	18,019	19,127	20,290	21,509
78,0	22,786	24,124	25,524	26,988	28,518
80,0	30,118	31,788	33,531	35,350	37,246
82,0	39,222	41,280	43,422	45,652	47,971
84,0	50,382	52,888	55,490	58,192	60,996
86,0	63,904	66,921	70,047	73,286	76,640
88,0	80,113	83,706	87,424	91,268	95,242
90,0	99,348	103,590	107,970	112,491	117,157
92,0	121,97	126,93	132,05	137,32	142,75
94,0	148,35	—	—	—	—

* Уравнение, описывающее эту зависимость, см. в табл. 8.4.

Таблица 8.34. **Зависимость между давлением насыщенных паров CF_4 (фреон-74) и T_{68}**

T, К	Приращение температуры, К				
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0
	Давление, Па				
90,0	119,70	147,49	180,76	220,41	267,46
95,0	323,01	388,31	464,77	553,90	657,42
100,0	777,18	915,22	1073,77	1255,24	1462,26
	Давление, 10^3 Па				
105,0	1,698	1,965	2,266	2,606	2,988
110,0	3,416	3,895	4,428	5,021	5,680
115,0	6,408	7,213	8,099	9,074	10,144
120,0	11,316	12,597	13,995	15,517	17,171
125,0	18,967	20,912	23,017	25,289	27,740
130,0	30,378	33,215	36,261	39,527	43,024
135,0	46,763	50,757	55,017	59,556	64,386
140,0	69,520	74,972	80,755	86,882	93,368
145,0	100,23	107,47	115,12	123,18	131,68
150,0	140,62	150,03	159,91	170,29	181,18
155,0	192,59	204,55	217,07	230,16	243,85
160,0	258,15	273,08	288,65	304,89	321,81
165,0	339,43	357,77	376,84	396,67	417,28
170,0	438,67	460,88	483,91	507,80	—

В области от 89,6 до 173 К давление p, Па, связано с температурой T_{68}, К, уравнением [64]

$$\ln(p/p_{\text{кр}}) = \left(A_1\tau + A_2\tau^{1,5} + A_3\tau^3 + A_4\tau^6\right)/T_R,$$

где $\tau = 1 - T_R$; $T_R = T_{68}/T_{\text{кр}}$; $p_{\text{кр}}$ — критическое давление, равное $3742 \cdot 10^3$ Па; $T_{\text{кр}}$ — критическая температура, равная 227,5 К; $A_1 = -6,7651056$; $A_2 = 1,0777437$; $A_3 = -1,7490971$; $A_4 = -2,5845119$.

8.7. ОПТИЧЕСКАЯ ПИРОМЕТРИЯ

Измерение температуры тел пирометрами основано на использовании законов излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Поскольку характер излучения реальных тел отличается от характера излучения АЧТ, то измеренная температура тела будет отличаться от действительной. Различают яркостную (спектральную), цветовую (спектрального отношения) и радиационную температуры.

Вопросы оптической пирометрии рассмотрены в [66—69].

Яркостная (спектральная) пирометрия основана на измерении интенсивности (яркости) излучения тел при фиксированной длине волны. Если для длины волны λ интенсивность излучения тела и интенсивность излучения АЧТ равны, то температура АЧТ будет равна *яркостной температуре* $T_я$ излучающего тела. С термодинамической температурой $T_я$ связана соотношением

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_я} + \frac{\lambda}{c_2}\ln(\varepsilon(\lambda, T)), \qquad (8.10)$$

где c_2 — вторая постоянная закона Планка, равная 0,014388 м·К; $\varepsilon(\lambda, T)$ — спектральный коэффициент теплового излучения тела на длине волны λ, м, при температуре T, К.

Формула (8.10) выведена в приближении закона Вина. При точных измерениях необходимо учитывать, что (8.10) дает заниженные значения T при температуре выше 3000 К.

Цветовая пирометрия (пирометрия спектрального отношения) основана на сравнении отношений интенсивности излучения для двух длин волн λ_1 и λ_2 для нечерного тела и АЧТ. Если эти отношения равны, то *цветовая температура* $T_ц$ равна температуре АЧТ. С термодинамической температурой $T_ц$ связана соотношением

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_ц} + \frac{1}{c_2}\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)^{-1}\ln\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}. \qquad (8.11)$$

Цветовая температура так называемых серых тел, характеризующихся условием $\varepsilon(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_2, T)$, совпадает с термодинамической. Метод спектрального отношения нечувствителен к серой среде (пропускательная способность которой удовлетворяет условию $\tau(\lambda_1) = \tau(\lambda_2)$), часто присутствующей между объектом и пирометром (например, пыль, дым, смотровые окна и т. д.).

Радиационная пирометрия основана на измерении полной (во всем спектральном интервале) энергии излучения тел. Если энергия полного излучения нечерного тела и энергия АЧТ равны, то температура АЧТ определяет *радиационную температуру* $T_р$ нечерного тела. Радиационная температура связана с термодинамической соотношением

$$T = T_р[\varepsilon_t(T)]^{-1/4}, \qquad (8.12)$$

где $\varepsilon_t(T)$ — интегральный коэффициент теплового излучения тела. Применение радиационных пирометров наиболее эффективно при низкой температуре, когда спектральная излучательная способность тел мала.

Излучательная (и отражательная) способность металлов и сплавов сильно зависит от состояния поверхности (шероховатости, наличия оксидных пленок и т. д.). В табл. 8.35—8.37 приведены данные, относящиеся к чистой полированной поверхности. В табл. 8.38 даны значения интегрального коэффициента теплового излучения некоторых оксидов.

Оптические методы и средства измерения температур описаны в [24, 25, 70—75].

Таблица 8.35. **Значения спектрального коэффициента теплового излучения ε_λ веществ для $\lambda = 0{,}65$ мкм [76—78]**

Вещество, (плотность, $\rho/\rho_{теор}$)	T, К	ε_λ *1
Ванадий	1000—2000	0,419—0,370
Вольфрам	1200—2600	0,453—0,418
Гафний	1500—1800	0,445—0,453
Германий	1000—2000	0,50—0,53
Графит искусственный	1200—3200	0,90—0,83
Двуоксид тория оплавленный (0,96) [85]	1500—3440	0,863—0,876*2
Двуоксид урана оплавленный (0,96) [85]	300—3120	0,824—0,836*2
Двуоксид циркония	1155—1800	0,40—0,55*3
Железо	1130—1430	0,38—0,35*3
Иридий	1300—2500	0,272—0,215
Карбид гафния	1300—2900	0,73—0,60
Карбид ниобия	1300—3400	0,66—0,49
Карбид тантала оплавленный (0,95) [85]	300—3000	0,514*2
Карбид урана оплавленный (0,965) [85]	300—1400—2780	0,615—0,556—0,539*2
Кобальт	1180—1530	0,39—0,37*3
Кремний	1000—1700	0,64—0,46
Молибден	1100—2800	0,409—0,352
Никель	1080—1500	0,36—0,32
Никель окисленный	1100—1500	0,86—0,82
Ниобий	1000—2600	0,368—0,348
Оксид магния	1000—1800	0,15—0,43
Осмий	1200—1800—2500	0,55—0,38—0,39
Палладий	1000—1700	0,400—0,306
Платина	1100—2000	0,292—0,300
Платина холоднокатаная	1100—1500	0,32—0,42
Рений	1000—2900	0,432—0,370
Родий	1100—2100	0,269—0,196
Тантал	1200—2400	0,445—0,414
Тантал старый	1100—1600—2800	0,49—0,44—0,41
Титан	1000—1900	0,503—0,444
Хром	1733	0,39
Цирконий	1000—2100	0,450—0,403

*1 Спектральная излучательная способность соответствует указанным температурам. Линейная интерполяция между точками достаточно точная.
*2 $\lambda = 0{,}665$ мкм.
*3 $\lambda = 0{,}63$ мкм.

Таблица 8.36. **Значения спектрального коэффициента теплового излучения ε_λ веществ при разных длинах волн [76]**

Вещество	T, К	Тип*1	Длина волны, мкм											
			0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Алюминий	293	n	0,081	0,083	0,089	0,098	0,111	0,140	0,111	0,068	0,030	0,026	0,024	0,023
Вольфрам*2	293 [78]	h	—	—	—	—	—	—	—	—	0,070	0,059	0,051	0,046
	1200	n	0,486	0,482	0,474	0,461	0,446	0,428	0,408	0,386	0,186	0,112	0,086	0,078
	2600	n	0,465	0,461	0,447	0,426	0,411	0,394	0,376	0,360	0,248	0,191	0,163	0,146
Графит*3	293 [78]	h	—	0,97	0,960	0,950	0,925	0,90	0,89	0,87	0,72	0,600	0,500	—
Железо	293 [78]	h	—	—	0,440	0,430	0,420	0,39	0,37	0,36	0,22	0,160	0,110	0,080
Золото	293	n	0,64	0,63	0,540	0,130	0,040	0,03	0,02	0,02	0,02	0,017	0,014	0,012
Медь	293	n	0,67	0,50	0,400	0,200	0,030	0,02	0,02	0,02	0,018	0,016	0,014	0,012
Молибден*2	293 [78]	n	—	0,480	0,475	0,463	0,461	0,459	0,420	0,405	0,125	0,082	0,073	0,060
	1000	n	—	0,458	0,438	0,417	0,394	0,367	0,333	0,302	0,106	0,063	0,046	0,035
	1400	n	—	0,440	0,422	0,403	0,383	0,361	0,333	0,310	0,151	0,096	0,073	0,059
	2000	n	—	0,419	0,403	0,387	0,370	0,352	0,333	0,317	0,191	0,133	0,102	0,084
Палладий	295	n	0,60	0,48	0,42	0,36	0,33	0,31	0,29	0,27	0,17	0,14	0,11	0,08
Серебро	293 [78]	h	—	—	0,08	0,06	0,05	0,045	0,04	0,03	0,025	0,02	0,02	0,02
Сталь углеродистая	293	n	0,50	0,45	0,42	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,22	0,16	0,12	0,10
Тантал*2	293 [78]	n	—	—	0,56*4	0,493*5	—	—	—	0,210	0,110	0,080	0,070	0,065
	1200	n	—	0,525	0,51	0,473	0,421	0,363	0,304	0,262	0,148	0,123	0,108	—
	2400	n	—	0,498	0,46	0,432	0,399	0,366	0,338	0,317	0,220	0,190	0,168	—

*1 n — значения спектрального коэффициента теплового излучения в направлении нормали; h — то же в пределах полусферы.
*2 В высокотемпературной области при фиксированной длине волны линейная интерполяция между указанными температурами достаточно точная.
*3 Графит пористый искусственный.
*4 $\lambda = 0{,}467$ мкм.
*5 $\lambda = 0{,}665$ мкм.

Таблица 8.37. **Значения интегрального коэффициента теплового излучения ε_t некоторых веществ [76—78]**

Вещество	T, К	Тип[*1]	ε_t[*2]
Алюминий:			
сильно окисленный	50—800	h	0,008—0,062
электролитически	360—800	h	0,20—0,33
окисленный, 4—10 мкм	310	h	0,72—0,83
Бериллий	1100—1300—1480	n	0,41—0,57—0,87
Бронза:			
алюминиевая	450—1270	n	0,03—0,06
окисленная	450—1270	n	0,08—0,16
Ванадий	1000—1300—2000	h	0,145—0,190—0,257
Вода:	273—373	n	0,92—0,96
лед гладкий	273	n	0,96
лед, покрытый инеем	273	n	0,985
Вольфрам	400—800—2000—3400	h	0,039—0,081—0,249—0,345
»	1200—1800—2200—3000	n	0,116—0,201—0,247—0,312
Гафний	1200—2000	h	0,284—0,324
Графит	1200—3200	h	0,77—0,83
Дюраль Д 16	500—900	n	0,016—0,03
Железо	160—1100	h	0,081—0,254
»	600—1100	n	0,20—0,56
Золото	50—1150	h	0,014—0,063
Иридий	1300—2500	h	0,12—0,21
»	295	n	0,04
Кадмий	80—300	h	0,03
Кобальт	1100—1500	h	0,21
Латунь:	373	n	0,06
отлично полированная	500—610	h	0,02
окисленная	450—590	n	0,56—0,64
Магний	410—490	h	0,12
Манганин прокатанный	391	n	0,048
Медь	50—300—800—1100	h	0,022—0,024—0,05—0,061
»	80—380—1160	n	0,02—0,01—0,02
» окисленная	300—600—800—1100	h	0,38—0,47—0,59—0,87
» окисленная	80—540—700—1078	n	0,66—0,78—0,90—0,93
Молибден	1100—2100—2400—2800	h	0,105—0,225—0,254—0,282
»	293	n	0,009
»	1100—2800	n	0,096—0,275
Никель	300—1500	h	0,068—0,196
»	500—1400	n	0,061—0,182
» окисленный	420—700—980	n	0,07—0,39—0,47
Ниобий	1000—1700—2400	h	0,116—0,187—0,244
»	1000—1800—2600	n	0,085—0,170—0,232
Нихром:			
прокатанный	800—950—1100	n	0,20—0,24—0,36
окисленный	480—900—1200	h	0,62—0,67—0,78
Оксид железа Fe_2O_3	310—1350	h	0,82—0,89
Олово	310—360	h	0,05
Палладий	1000—1300—1600	h	0,10—0,15—0,18
»	400—1520	n	0,02—0,17
Платина	300—1000—1400—1900	h	0,041—0,128—0,167—0,200
»	400—800—1600—2000	n	0,029—0,080—0,162—0,184
Рений	1000—1400—1900—	h	0,164—0,201—0,255—
»	2300—2600—2900	h	0,290—0,309—0,322
Родий	900—1200—1600—	h	0,068—0,112—0,150—
»	1900—2200	h	0,169—0,183
Ртуть чистая	900—1600	n	0,053—0,100
Свинец:	273—373	n	0,09—0,12
серый окисленный	310—530	h	0,04—0,08
окисленный при 473 К	270—470	h	0,28
Серебро	473	h	0,63
»	100—1100	h	0,012—0,046
	80—300	n	0,020—0,075

Вещество	T, К	Тип*1	ε_t*2
Сталь:			
углеродистая	100—1400	h	0,06—0,31
» окисленная	573—1073	h	0,86—0,91
07Х16Н6	250—900	n	0,13—0,28
» окисленная при 1173 К	300—1000	n	0,84
12Х18Н10Т	180—700—1200	n	0,13—0,24—0,38
08Х18Н12Б	100—1000—1390	n	0,17—0,25—0,65
Стекло	293	n	0,94
Сурьма	300—350	n	0,28—0,31
Тантал	1000—2300—2700—3300	h	0.132—0,251—0,282—0,316
»	80—300	n	0,020—0,075
»	1300—1600—2000	n	0,132—0,170—0,260
» нитрид	800—1500—2600	n	0,74—0,80—0,60
Теллур	295	n	0,22
Титан:	900—1400—1900	h	0,217—0,274—0,323
электрополированный	250—370	h	0,10—0,13
карбид	1200—3000	h	0,60—0,75
Уран	1200	h	0,35
» карбид	1600—2000	h	0,42
Хром	270—600—750—1220	n	0,06—0,06—0,10—042
»	80	h	0,07
Цинк	300—530	n	0,02—0,06
» окисленный	300—470—800	n	0,28—0,14—0,11
Цирконий	1100—1600—2100	h	0,204—0,248—0,278
Карбид	1400—2900	h	0,40—0,55
Диборид	1200—2500	h	0,53—0,75

*1 n — значения интегрального коэффициента теплового излучения в направлении нормали; h — то же в пределах полусферы.
*2 Значения интегрального коэффициента теплового излучения соответствуют указанным температурам. Линейная интерполяция между точками достаточно точная.

Таблица 8.38. **Значения интегрального коэффициента теплового излучения некоторых оксидов [76]**

Вещество	Температура, К												
	20	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600
MgO	0,73	0,69	0,57	0,52	0,42	0,35	0,30	0,28	0,29	0,35	0,49	—	—
ZrO_2	0,81	0,75	0,65	0,53	0,42	0,37	0,37	0,39	0,46	0,55	0,62	0,66	0,69
ThO_2	—	—	0,61	0,52	0,43	0,38	0,37	0,40	0,49	0,61	0,68	0,71	—
Al_2O_3	—	0,79	0,71	0,60	0,52	0,46	0,42	0,40	0,39	—	—	—	—

8.8. ТЕРМОИНДИКАТОРЫ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Термоиндикаторы (ТИН) — вещества (смеси веществ), изменяющие свой внешний вид (цвет, яркость свечения, форму) при определенной температуре — критической температуре ТИН $t_{кр}$ и используемые для регистрации этой температуры.

ТИН подразделяют на две группы: обратимые — ТИН, исходный внешний вид (цвет или яркость свечения) которых восстанавливается после восстановления исходной температуры; необратимые — ТИН, необратимо изменяющие свой внешний вид (цвет или форму) при воздействии критической температуры. Различают пять типов ТИН: термохимический индикатор, кристаллоструктурный, люминесцентный, жидкокристаллический ТИН и ТИН плавления. ТИН применяют в виде термопорошков, термокрасок, термолаков, термопаст, термокарандашей и термотаблеток. Измерение температур термоиндикаторами описано в [79—81].

Измерители максимальной температуры кристаллические (ИМТК) — датчики максимальной температуры, рабочее вещество которых (обычно облученные нейтронами алмаз или карбид кремния) изменяет параметр кристаллической решетки в зависимости от температуры и времени выдержки. Максимальную температуру определяют с помощью градуировочного графика по изменению параметра решетки с учетом времени выдержки (длительность отжига) [82]. ИМТК используют для измерения температур в диапазоне 150—1200 °С с временамв выдержки от 10^2 до 10^6 с. Погрешность измерений составляет ±6 °С на стационарных режимах и ±12 °С на нестационарных. ИМТК имеют малые размеры: стандартный — диаметр 1 и длина 5 мм; микроизмеритель — 0,3×0,3×0,3 мм.

Не обладая большой точностью, методы термоиндикаторов и измерителей максимальной температуры иногда полезны, а в ряде случаев и труднозаменимы (при исследовании тепловых полей, в аэродинамических измерениях, при измерении температур токонесущих элементов, деталей машин и механизмов и т. п.).

Таблица 8.39. **Классификация термоиндикаторов [81]**

Тип	Вид	Группа по обратимости	Температурный диапазон, °С	Относительная погрешность, %	Количество цветовых переходов	Зависимость от условий нагрева
Термохимические	Порошок, краска, паста, лак, карандаш, таблетка, печатная краска	Обратимые, необратимые, квазиобратимые	50÷1000	2,5—10	Один или несколько	Зависимые
Термоиндикаторы плавления	Порошок, краска, паста, лак, карандаш, таблетка, печатная краска	Необратимые, обратимые	35÷1150	0,5—2,5	Один	Независимые
Жидкокристаллические	Порошок, краска	Обратимые	—20÷+250	0,1—2	Неограниченное количество	Зависимые
Люминесцентные	Порошок, краска, паста, лак, карандаш, таблетка, печатная краска	»	—200÷+100	0,5—2	Один или несколько	То же

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Comptes** Rendus des Seances de la Treizieme Conference Generale des Poids et Mesures (1967—1968); Resolutions 3 and 4, P. 104.
2. **Кричевский И. Р.** Понятия и основы термодинамики. — 2-е изд. М.: Химия, 1970.
3. **Wolfe H. G.** The Temperature concept; **Temperature,** its measurements and control in scienc and industry. **Ed** by Hugh C. Wolfe. N. Y.; Beinhold, 1955. Vol. 2. **Ch. 1.** P. 3—8.
4. **de Boer J.**//Metrologia. 1965. Vol. 1. P. 158—169.
5. **Quinn T. J., Compton J. P.**//Rep. Prog. Phys. 1975. Vol. 38. P. 151—239.
6. **Попов М. М.** Термометрия и калориметрия. — 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1954.
7. **Гордов А. Н.** Температурные шкалы. М.: Изд-во стандартов, 1966.
8. **Hudson R. P.**//Rev. Sci. Instrum. 1980. Vol. 51. P. 871—881.
9. **Hall J. A.**//J. Sci. Instrum. 1966. Vol. 43. P. 511—547.
10. **Куинн Т.** Температура: Пер. с англ./Под ред. Д. Н. Астрова. М: Мир, 1985.
11. **Орлова М. П.** Низкотемпературная термометрия. М.: Изд-во стандартов, 1975.
12. **Temperature,** its measurement and control in science and industry. Vol. 1. N. Y.: Reinhold, 1941; Vol. 2 N. Y.: Reinhold, 1955; Vol. 3. N. Y.: Reinhold, 1962; Vol. 4. Pittsburgh: Instrument Society of America, 1972; Vol. 5. N. Y.: American Institute of Physics. 1982.
13. **The International** Practical Temperature Scale of 1968//Metrologia. 1969. Vol. 5. P. 35—44.
14. **Международная** практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ—68). М.: Изд-во стандартов, 1971.
15. **Preston-Thomas H.**//Metrologia. 1976. 12. P. 7—17.
16. **Crovini L., Bedford R. E., Moser A.**//Metrologia. 1977. Vol. 13. P. 197—206.
17. **Bedford R. E., Crovini L., Maas H., Skakala J.**// Comité Consultatif de Thermometrie, 13e Session, Annexe T3. 1980. P. T55—T79.
18. **Bedford R. E., Bonnier G., Maas H., Pavese F.**// Comité Consultatif de Thermometrie, 14e Session, Appendix T3, 1982. P. T124—T132.
19. **The 1976** Provisional 0, 5 K to 30 K temperature Scale//Metrologia. 1979. Vol. 15. P. 65—68.
20. **Brickwedde F. G., Van Dijk H., Durieux M., Clement J. R., Logan J. K.**//J. Res. NBS. 1960. Vol. 64A P. 1—18.
21. **Sherman R. H., Sydoriak S. G., Roberts T. R.**// J. Res. NBS. 1964. Vol. 68A. P. 547—588.
22. **Кытин Г. А., Астров Д. Н.**//Измерительная техника. 1983. №. 4. С. 62—63.
23. **Comite** Consultatif de Thermometrie. 14 Session, 1982. Recommendation T1. P. T85—T86.
24. **Геращенко О. А., Гордов А. Н., Лах В. И. и др.** Температурные измерения: Справочник. Киев: Наукова думка, 1984.
25. **Сосновский А. Г., Столярова Н. И.** Измерение температур. М.: Изд-во стандартов, 1970.
26. **Линевег Ф.** Измерение температур в технике: Справочник/Пер. с нем./Под ред. Л. А. Чарихова. М.: Металлургия, 1980.
27. **Геращенко О. А., Федоров В. Г.** Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство. Киев: Наукова думка, 1965.
28. **Wise J. A.** Liquid-in-glass thermometry//NBS Monograph. 1976. Vol. 150.
29. **Thompson R. D.**//ISA Trans. 1968. Vol. 7. P. 87—92.
30. **Ween S.**//ISA Trans. 1968. Vol. 7. P. 93—100.
31. **Стрелков П. Г., Боровик-Романов А. С., Орлова М. П.**//Журн. физ. хим. 1954. Т. 28. № 2. С. 345—352.
32. **Бродский А. Д.** Новые методы измерения низких температур. М.—Л.: Изд-во стандартов, 1962.
33. **Датчики** для измерения температуры в промышленности/Г. В. Самсонов, А. И. Киц, О. А. Кюздени и др. Киев: Наукова думка, 1972.
34. **Бочковский Р. В.** Контактные датчики температуры. М.: Металлургия, 1978.
35. **Вепшек Я.** Измерение низких температур электрическими методами: Пер. с чеш./Под ред. М. П. Орловой. М.: Энергия, 1980.
36. **Riddle J. L., Furukawa G. T., Plumb H. H.**//Platinum Resistance Thermometry. 1973. Vol. 126.

37. **Johnston J. S.**//Temperature Measurement 1975. Conference Series N 26. Lond.: Institute of Physics. 1975. P. 80—90.

38. **Anderson R. L., Kollie T. G.**//Critical Rev. in Analyt. Chem. 1975. Vol. 6. P. 171—221.

39. **Dauphinee T. M., Preston-Thomas H.**//Rev. Sci. Instrum. 1954. Vol. 25. P. 884—886.

40. **Орлова М. П., Астров Д. Н., Медведева Л. А.**// Приборы и техника эксперимента. 1964. № 1. С. 230—232.

41. **Кытин Г. А., Астров Д. Н., Зорин Р. В.** Усовершенствование конструкции и исследование воспроизводимости показаний германиевых термометров сопротивления//Тр. ВНИИФТРИ. 1973. Вып. 4(34). С. 83—92.

42. **Зарубин Л. И., Немиш И. Ю.** Характеристики термометров сопротивления для криогенных температур// Полупроводниковая техника и микроэлектроника. Киев: Наукова думка. 1974. Вып. 17. С. 77—79.

43. **Rubin L. G., Brandt B. L., Sample H. H.**//Cryogenics. 1982. Vol. 22. P. 491—503.

44. **Варфоломеев С. Ф., Пекальн Л. А., Альшин Б. И.** и др.//Приборы и техника эксперимента. 1977, № 1. С. 262—264.

45. **Логвиненко С. П., Бевза Ю. Г.**//Измерительная техника. 1967. № 1. С. 42—44.

46. **Логвиненко С. П., Алуф Г. Д., Зароченцева Т. М.** Использование диодов для измерения низких температур//Тр.ФТИНТ. 1972. Вып. 2. С. 72—74.

47. **White G. K.** Experimental Techniques in Low-Temperature Physics. 3-d ed. Oxford: Clarendon Press. 1979. Ch. IV

48. **Астров Д. Н., Белянский Л. Б.** Измерение низких температур (обзор)//Физика низких температур. 1967. Т. 2. № 7. С. 821—848.

49. **Burns G. W., Hurst W. S.**//Temperature Measurement. 1975. Conference Series N 26, Lond.: Institute of Physics. 1975. P. 144—161.

50. **Данишевский С. К., Сведе-Швец Н. И.** Высокотемпературные термопары. М.: Металлургия, 1977.

51. **Самсонов Г. В., Кислый П. С.** Высокотемпературные неметаллические термопары и наконечники. Киев: Наукова думка, 1965.

52. **Guildner L. A., Burns G. W.**//High Temp.-High Press. 1979. Vol. 11. P. 173—192.

53. **Bedford R. E.**//High Temp.-High Press. 1972. Vol. 4. P. 241—260.

54. **Kinzie P. A.**//Thermocouple Temperature Measurement. N. Y.: John Wiley. 1973.

55. **Медведева Л. А., Орлова М. П., Алексахин И. А., Духовлинова Н. Д.** Измерение низких температур термопарами на основе сплава золота с кобальтом//Тр. ВНИИФТРИ. 1973. Вып. 4(34). С. 154—180.

56. **Медведева Л. А., Орлова М. П., Рабинькин А. Г.** Измерение низких температур термопарами на основе сплава золота с железом//Тр. ВНИИФТРИ. 1973. Вып. 4(34). С. 181—192.

57. **Бейлин В. М., Лапп Г. Б., Павлов Б. П. и др.**// Измерительная техника. 1975. № 6. С. 35—36.

58. **ГОСТ 3044—77.** Преобразователи термоэлектрические. Градуировочные таблицы

59. **Методы** измерения температур: Сб. статей./Под ред. В. А. Соколова. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.

60. **Рогельберг И. Л., Бейлин В. М.** Сплавы для термопар: Справочник. М.: Металлургия, 1983.

61. **Hudson R. P.**//Experimental Cryophysics. Lond.: Butterworths. 1961. Ch. 9.

62. **Cataland G., Edlow M. H., Plumb H. H.** Recent experiments on liquid helium vapor pressure measurements from 2 to 4 K: Temperature, its measurement and control in science and industry. N. Y.: Reinhold. 1962. Vol. 3(1). P. 413.

63. **Sydoriak S. G., Rogerst T. R., Sherman R. H.**// J. Res. NBS. 1964. Vol. 68A. P. 547—559.

64. **Lobo L. Q., Staveley L. A. K.**//Cryogenics. 1979. Vol. 19. P. 335—338.

65. **Frels W., Smith D. R., Ashworth T.**//Cryogenics. 1974. Vol. 14. P. 3—7.

66. **Рибо Г.** Оптическая пирометрия. М.—Л.: Гостехтеориздат, 1934.

67. **Гаррисон Т. Р.** Радиационная пирометрия. М.: Мир, 1964

68. **Гордов А. Н.** Основы пирометрии. — 2-е изд. М.: Металлургия, 1971.

69. **Киренков И. И.** Метрологические основы оптической пирометрии. М.: Изд-во стандартов, 1976.

70. **Оптические** методы измерения температур в металлургии. Теория, системы, элементы: Сб. статей/Под ред. Д. Я. Света. М.: Наука, 1979

71. **Свет Д. Я.** Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982.

72. **Поскачей А. А., Чубаров Е. П.** Оптикоэлектронные системы измерения температуры. М.: Энергия, 1979.

73. **Поскачей А. А., Чарихов Л. А.** Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. М.: Металлургия, 1978.

74. **Чернин С. М., Коган А. В.** Измерение температуры малых тел пирометрами излучения. М.: Энергия, 1980.

75. **Методы** и средства оптической пирометрии. М.: Наука,, 1983.

76. **Излучательные** свойства твердых материалов: Справочник/Под ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974.

77. **Новицкий Л. А., Степанов Б. М.** Оптические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1980.

78. **Kaspar J. Radiometry**//American Institute of Physics Handbook. 3-d ed. N. Y.: McGraw-Hill Company. 1972.

79. **Абрамович Б. Г.** Термоиндикаторы и их применение. М.: Энергия, 1972.

80. **Абрамович Б. Г., Картавцев В. Ф.** Цветовые индикаторы температуры. М.: Энергия, 1978.

81. **Абрамович Б. Г., Матвеев В. В.** Метод измерения температуры термоиндикаторами//Методы и средства оптической пирометрии. М.: Наука, 1983.

82. **Николаенко В. А., Карпухин В. И.** Измерение температуры с помощью облученных материалов. М.: Энергоатомиздат, 1986.

83. **Supplementary** information for the IPTS-68 and EPT-76//Monographie Bureau International des Poids et Mesures. 1st ed. July 1983.

84. **Rusby R. L., Durieux M.**//Cryogenics. 1984. Vol. 4. P. 363—366.

85. **Boder M., Karow H. U., Müller K.**//High Temp.—High Press. 1980. Vol. 12. P. 161—168.

ГЛАВА 9
ТЕПЛОЕМКОСТЬ

М. Н. Хлопкин

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Определение и единицы теплоемкости

Теплоемкость тела C есть отношение количества теплоты ΔQ, подведеиной к телу в даиных условиях, к соответствующему повышению температуры ΔT. В соответствии с третьим началом термодииамики теплоемкость любого тела стремится к нулю при приближении к абсолютному нулю температуры.

Удельная c, Дж/(кг·К), и молярная C, Дж/(моль·К), теплоемкости вещества определяются как теплоемкости соответственно единицы массы и одного моля даиного вещества. Они связаны соотношением $C=Mc$, где M — масса одного моля, кг.

Теплоемкость тела зависит от условий нагревания. Наиболее употребительны: теплоемкость при постоянном давлеиии (изобарная теплоемкость) c_p, теплоемкость при постоянном объеме (изохорная теплоемкость) c_v и теплоемкость под давлением насыщеиных паров (вдоль лиии сосуществования фаз) c_s. Величины c_p и c_v, Дж/(моль·К), связаны соотношением

$$c_p - c_v = \alpha^2 TV/k_T ,$$

где α — температуриый коэффициент объемного расширения, $К^{-1}$; T — температура, К; V — молярный объем, $м^3$/моль; k_T — изотермическая сжимаемость, $Н/м^2$ (Па).

Теплоемкость твердых тел

Разность c_p—c_v для твердых тел обычно невелика. Теплоемкость твердых тел за исключением твердого гелия, слабо зависит от давления.

Важнейшим параметром, характеризующим температурную зависимость теплоемкости твердого тела, является характеристическая температура Дебая (дебаевский параметр) θ, К, определяемая соотношеиием $k\theta=h\nu$, где k — постоянная Больцмаиа, Дж/К; h — постоянная Планка, Дж·с; ν — максимальная частота колебаний атома в кристалле, Гц.

В соответствии с квантовой теорией Дебая молярная колебательная теплоемкость твердого тела c_v, Дж/(моль·К), определяется соотношением

$$c_v = 3RnD\,(\theta/T),$$

где R — газовая постоянная, Дж/(моль·К); n — число атомов в молекуле: D — фуикция Дебая (табулирована в табл. 9.7); θ — дебаевский параметр, К; T — температура, К.

При температуре, большей дебаевской ($T>\theta$), выполняется закон Дюлонга — Пти

$$c_v = 3Rn \approx 25n \text{ Дж/(моль·К)}.$$

При низкой по сравнению с дебаевским параметром температуре ($T<0{,}1\ \theta$) молярную теплоемкость твердого тела c_v, Дж/(моль·К), обычно представляют так:

$$c_v = 1944\ n\,(T/\theta)^3 + \gamma T,$$

где n, T и θ — те же величиины, что и в предыдущих соотношениях; γ — коэффициент электроиной теплоемкости, Дж/(моль·$К^2$). Для диэлектриков и полупроводников $\gamma=0$. Большие отклонения температурного хода теплоемкости от приведенного выше соотношения наблюдаются в лантаноидах, актиноидах, их химических соединениях, а также при наличии в веществе магнитных ионов, когда существенный вклад в теплоемкость дают тепловые возбуждения электронов внутренних оболочек атомов и магнитных моментов ионов. Происходящие в твердом теле процессы упорядочения (структурного, магнитного, сверхпроводящего и др.) также ведут к существенным аномалиям теплоемкости.

Теплоемкость разреженных газов

Разность изобарной и изохорной молярных теплоемкостей c_p—c_v, Дж/(моль·К), разреженных газов описывается соотношением c_p—$c_v=R$, где R — универсальная газовая постоянная.

Согласно закону распределения каждая поступательиая и вращательная степень свободы молекулы дает в молярную изохорную теплоемкость вклад, равный $R/2$, а каждая возбужденная колебательная — вклад, равный R. Колебательные степени свободы возбуждаются и дают вклад в теплоемкость лишь при высокой температуре ($T>h\nu/k$, где ν — частота колебаний атомов в молекуле). При учете поступательных и вращательиых степеней свободы и пренебрежении колебательными закон равнораспределения дает для молярных изохорной c_v и изобариой c_p теплоемкостей, Дж/(моль·К): $c_v=1{,}5\ R$; $c_p=2{,}5\ R$ — для одноатомного газа; $c_v=2{,}5\ R$; $c_p=3{,}5\ R$ — для двухатомного газа; $c_v=3\ R$; $c_p=4\ R$ — для многоатомного газа.

Эти соотиошения хорошо выполняются для одноатомных газов, хуже для двухатомных и плохо для многоатомиых. Теплоемкость двух- и многоатомных газов при иизкой температуре меньше, чем следует из закона равнораспределеиия, вследствие уменьшения вклада вращательных степеней свободы. При высокой же температуре теплоемкость этих газов больше, чем следует из закона равнораспределения, вследствие термического возбуждения колебательных степеней свободы и частичной диссоциации молекул.

Теплоемкость плотных газов и жидкостей

Для плотных газов в отличие от разреженных разность молярных теплоемкостей c_p—c_v может существеиио отличаться от универсальной газовой постояниой R. Молярная теплоемкость плотного газа, как правило, больше, чем разреженного. С приближением к критической точке теплоемкость газа возрастает и в критической точке обращается в бесконечиость. Для описания теплоемкости жидкости не существует простых закономериостей.

Теплоемкость сплавов, растворов и смесей

Теплоемкость сплавов, растворов и смесей нескольких компонентов $c_{см}$ с небольшим отличием от идеальности приближенно удовлетворяет правилу аддитивности Коппа — Неймана

$$c_{см} = \sum_j z_j C_j,$$

где z_j — мольная (массовая) доля j-го компоиента смеси; C_j — молярная (удельная) теплоемкость j-го компонента. Правило аддитивности хорошо выполняется для разрежеиных газов и хуже — для плотных газов. Существен-

иые отклонения от правила аддитивности наблюдаются в растворах электролитов, в ряде интерметаллических соединений, а также при наличии фазовых переходов.

Теплоемкость вблизи фазовых переходов

Для фазовых переходов первого рода (испарение, плавление, сублимация, переход из одной кристаллической модификации в другую и т. д.) характерно скачкообразное изменение энтальпии, что приводит к соответствующей скрытой теплоте перехода ΔH. Теплоемкость при фазовом переходе первого рода, как правило, изменяется, причем теплоемкость высокотемпературной фазы может быть как больше, так и меньше теплоемкости низкотемпературной фазы.

При фазовых переходах второго рода происходит непрерывное изменение эитальпии, выделения скрытой теплоты не происходит, а теплоемкость испытывает скачок, сопровождающийся резким максимумом. При фазовых переходах второго рода теплоемкость низкотемпературной фазы, как правило, больше теплоемкости высокотемпературной фазы.

Справочная литература по теплоемкости

Термодинамические функции (теплоемкость, энтропия и энтальпия) индивидуальных веществ (элементов и химических соединений) при температуре 298,15 К приведены в [1]. В [2] приведены термодинамические функции индивидуальных веществ (преимущественно в газообразном состоянии) в широкой области температур. Теплоемкости элементов и бинарных сплавов в широком интервале температур содержатся в [3, 15]. Теплоемкости элементов, неорганических и органических соединений приведены в [4]. Теплоемкости материалов при температурах ниже 300 К содержатся в [5].

9.2. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

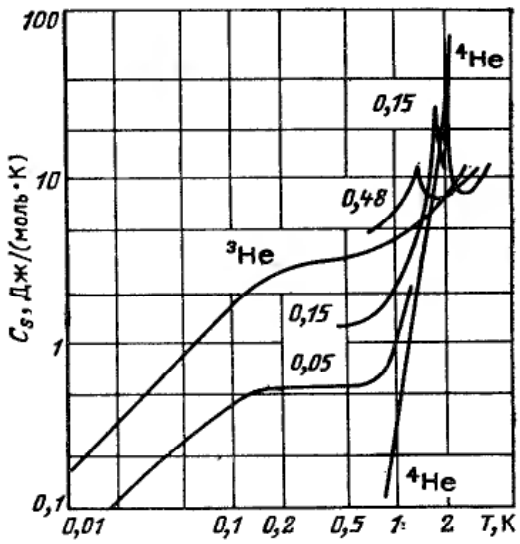


Рис. 9.1. Молярные теплоемкости C_s жидких изотопов гелия ^{3}He и ^{4}He и растворов ^{3}He—^{4}He с молярной долей ^{3}He, равной 0,05; 0,15; 0,48 при давлении насыщающих паров [51]

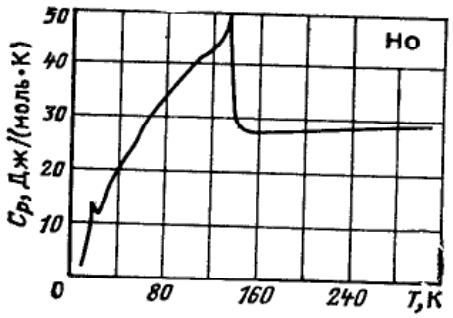


Рис. 9.2. Молярная теплоемкость гольмия [4]

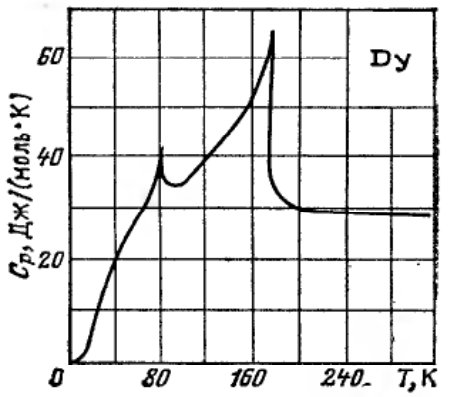


Рис. 9.3. Молярная теплоемкость диспрозия [4]

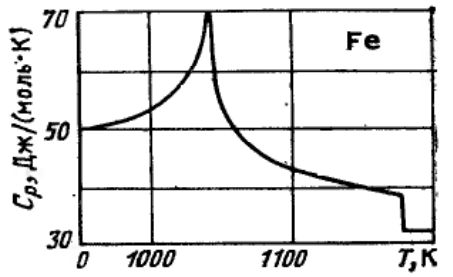


Рис. 9.4. Молярная теплоемкость железа вблизи ферромагнитного фазового перехода [52]

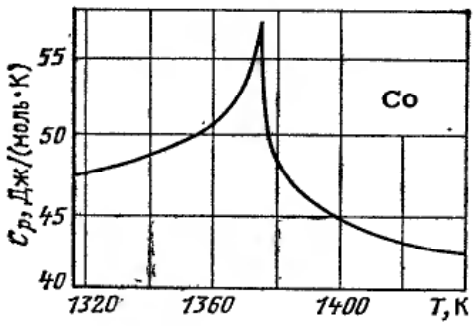


Рис. 9.5. Молярная теплоемкость кобальта вблизи ферромагнитного фазового перехода [53]

В табл. 9. 1 — 9.7 и на рис. 9.1 — 9.10 приведены значения теплоемкости элементов

Таблица 9. 1. Молярная изобариая теплоемкость c_p элемеитов при температуре 298,15 К и давление 0,10135 МПа

Вещества в жидком и газообразиом состояниях отмечены буквами «ж» н «г». Различные кристаллические модификации отмечены греческими буквами α, β, γ, δ и др. Теплоемкость газов приведена в состоянии идеального газа, т. е. при предельно низком давлении. Химическая формула приведеиа лишь для неодноатомных молекул

Вещество, формула	c_p, Дж/(моль·К)	Литература	Вещество, формула	c_p, Дж/(моль·К)	Литература
Азот N_2 (г)	29,12	[2]	Нептуний	29,46	[1]
Актиний	27,20	[1]	Никель	26,07	[1]
Алюминий	24,35	[2]	Ниобий	24,44	[2]
α-америций	25,86	[1]	β-Олово белое	27,11	[2]
Аргон (г)	20,79	[3]	α-Олово серое	25,78	[1]
Барий	28,10	[2]	Осмий	24,70	[1]
α-Бериллий	16,44	[2]	Палладий	25,86	[1]
Бор (кр)	11,09	[2]	Платина	25,86	[1]
Бор аморфный	11,95	[2]	α-Плутоний	31,20	[1]
Бром Br_2 (ж)	75,68	[2]	Полоний	26,40	[1]
Бром Br_2 (г)	36,06	[2]	α-Празеодим	27,45	[1]
Ванадий	24,48	[2]	Радон (г)	20,79	[2]
Висмут	26,02	[1]	Рений	25,23	[1]
н-Водород H_2 (г)	28,83	[2]	Родий	24,98	[1]
орто-Водород H_2 (г)	28,46	[2]	Ртуть (ж)	27,98	[1]
пара-Водород H_2 (г)	29,95	[2]	Рубидий	31,05	[1]
Вольфрам	24,27	[2]	Рутений	24,06	[1]
α-Гадолиний	37,07	[1]	Самарий	29,54	[1]
Галлий	26,07	[2]	Свинец	26,65	[2]
Гафний	25,69	[2]	Селен гексагональный	25,36	[1]
Гелий (г)	20,79	[3]	Селен моноклинный	27,20	[1]
Германий	23,22	[2]	Селен аморфный	29,30	[1]
α-Гольмий	27,15	[1]	Селен Se_2 (г)	35,40	[1]
н-Дейтерий D_2 (г)	29,20	[2]	Сера ромбическая	22,69	[2]
Диспрозий	28,16	[1]	Сера моноклинная	23,64	[1]
Европий	27,66	[1]	Сера S_2 (г)	32,50	[2]
α-Железо	24,98	[1]	Сера S_8 (г)	160,70	[1]
β-Железо	26,74	[4]	Серебро	25,36	[1]
Золото	25,40	[1]	Скандий	25,50	[1]
Индий	26,90	[2]	Стронций	25,51	[2]
Иод I_2	54,44	[2]	Сурьма	25,23	[1]
Иод I_2 (г)	36,89	[2]	Сурьма Sb_2 (г)	35,40	[1]
Ирндий	25,10	[1]	Таллий	26,32	[2]
Иттербий	26,74	[1]	Тантал	25,29	[2]
Иттрий	26,52	[2]	Теллур	25,78	[1]
Кадмий	26,02	[1]	Тербий	28,91	[1]
Калий	29,60	[2]	Технеций	24,00	[1]
Кальций	25,94	[2]	Титан	25,06	[2]
Кислород O_2 (г)	29,38	[2]	*н*-Тритий T_2 (г)	29,20	[1]
Кислород, озон O_3 (г)	39,37	[2]	Торий	26,23	[2]
α-Кобальт	24,8	[1]	Тулий	27,03	[1]
Кремний	19,79	[2]	Углерод, алмаз	6,109	[2]
Криптон (г)	20,79	[2]	Углерод, графит	8,536	[2]
Ксенон (г)	20,79	[2]	α-Уран	27,67	[2]
Лантан	27,11	[2]	Фосфор белый	23,82	[2]
β-Литий	24,85	[1]	Фосфор красный	21,21	[1]
Лютеций	26,50	[1]	Фосфор черный	21,59	[1]
Магний	24,90	[2]	Фосфор P_2 (г)	32,05	[1]
α-Марганец	26,28	[1]	Фосфор P_4 (г)	67,15	[1]
β-Марганец	26,50	[1]	Франций (ж)	28,40	[1]
γ-Марганец	27,57	[1]	Фтор F_2 (г)	31,30	[2]
Медь	24,43	[1]	Хлор Cl_2 (г)	33,94	[2]
Молибден	23,93	[1]	Хром	23,55	[2]
Мышьяк	24,68	[1]	Цезий	32,17	[1]
Мышьяк As_2 (г)	35,10	[1]	β-Церий	26,94	[1]
Мышьяк As_4 (г)	77,40	[1]	Цинк	25,44	[1]
β-Натрий	28,20	[1]	Цирконий	25,40	[2]
Неодим	27,40	[1]	Эрбий	25,44	[1]
Неон (г)	20,79	[3]			

Таблица 9.2. **Удельная изобарная теплоемкость c_p, Дж/(кг · К), элементов прн температуре от 20 до 1500 К и давлении 0,1 МПа**

Изменение состояния вещества обозначено до н после фазового перехода: т — твердое, ж — жидкое, г — газообразное. Различные кристаллнческие модификации твердого состояния отмечены греческими буквами α, β, γ, δ и пр.

Вещество	Температура, К									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
Азот N_2	681 (α)	1350 (β)	1022 (г)	1048	1042	1045	1075	1168	1244	[3, 6]
Алюминий	8,9	78	376	675	858	951	1037 (т)	1177 (ж)	—	[2, 5]
Аргон	306	560	836 (т)	526 (г)	521	521	521	521	521	[7]
Барий	67,4	135	168*1	186	198	259	300	328 (т)	281 (ж)	[2, 3]
Бериллий	1,61	9,96	90,6	624	1560	2179	2559	3060	3604	[2, 5]
Бор аморфный	8,9	7,1	58*1	333	859	1463	1892	2337	—	[3]
Бор (кр)	2,2	1,5	42*1	299	816 (γ)	1416 (β)	1931	2306	2597	[3]
Бром Br_2	79,6	181	253	308	371 (т)	230 (г)	233	236	239	[2]
Ванадий	7,1	39	174*1	370	465	515	540	597	714	[3]
Висмут	35	74	102*1	117	—	127 (т)	141 (ж)	—	—	[3]
н-Водород*2	9530 (ж)	10 570 (г)	10 730	12 600	14 040	14 480	14 550	14 980	16 050	[8]
пара-Водород*2	9530 (ж)	10 570 (г)	11 720	16 150	15 330	14 550	14 550	14 980	16 050	[8]
Вольфрам	1,89	18,4	71,5	113	131	136	140	148	158	[2, 5]
Гадолиний	25,4	97	163*1	208	265	179	185	207	243	[3]
Галлий	32,1	110	221*1	316	375 (т)	394 (ж)	382	376	377	[3]
Германий	12,5	61	142*1	256	310	337	347	375 (т)	380 (ж)	[3]
Гольмий	58	124	197*1	161	163	169	172	193	271	[3]
α-диспрозий	34,5	115	201	280	173	173	175	195	274	[3]
Европий	65	—	—	—	—	184	199	250	—	[3]
Железо*3	4,6	30	138*1	324	422	489	574	975 (α)	654 (γ)	[3]
Золото	15,9	57,2	99,2	119	127	131	135	146 (т)	159 (ж)	[3, 5]
Индий	60,8	141	193	218	229	250 (т)	245 (ж)	238	236	[2, 5]
Иод I_2	64	124	171	195 (т)	—	313 (ж)	148 (г)	150	153	[2]
Иридий	2,0	22	68*1	110	125	129,5	135	150	—	[3]
Иттербий	45,7	102	132*1	145	151	160	172	184	—	[3]
Иттрий	21,3	101	199*1	265	292	305	321	354	397	[3]
Кадмий	46	117	182	213	227	241 (т)	264 (ж)	—	—	[3]
Калий	251	494	610	666	717 (т)	805 (ж)	770	792	926	[9]
Кальций	36	188	405	575	—	655	738 (α)	1020 (β)	—	[3]
Кислород, O_2	429 (α)	1289 (β)	1689 (ж)	920 (г)	915	942	1003	1090	1143	[2, 10]
Кислород, O_3 (озон)	—	—	—	—	—	916 (г)	1048	1166	1243	[2, 10]
Кобальт	5,4	39,6	162*1	331	405	450	503 (α)	627 (β)	674	[3]
Кремний (кр)	3,37	44	188	426	648	794	871	946	1013	[2, 5]
Криптон*2	188	276	345 (т)	258 (г)	250	249	248	248	—	[7]
Ксенон*2	133	178	202	261 (т)	162 (г)	159	159	158	—	[7]
Лантан	46	113	—	182	—	197 (α)	197 (β)	238	247 (ж)	[3]
α-Литий	55,9	350	1390	—	—	—	—	—	—	[3]
β-Литий	—	—	1340	2653	3383	3974 (т)	4251 (ж)	4154	4203	[3]
Лютеций	20,9	73	—	141	151	153	156	173	217	[3]
α-Марганец	8,9	50,6	193*1	365	454	515	581	—	—	[3]
β, δ-Марганец	21,7	71,6	201*1	378	465	—	—	686 (β)	837 (δ)	[3]
γ-Марганец	—	—	190*1	372	470	—	—	—	—	[3]
Медь	7,29	58,76	202,6	322,6	373,3	397,5	416,7	451,1 (т)	513 (ж)	[3, 11]
Молибден	2,8	23,6	104	193	238	264	276	294	—	[2, 5]
α-Мышьяк	15,6	74,6	175	275	314	339	354	383	—	[3]
α-Натрий	157	531	—	—	—	—	—	—	—	[3]
β-Натрий	170	540	879	1074	1176 (т)	1370 (ж)	1296	1257	—	[3, 9]
Неодим	71	127	176*1	—	—	200	222	291	—	[3]
Неон*2	945 (т)	1066 (г)	1035	1031	1030	1030	1030	1030	1030	[7]
α-Нептуний	—	—	—	—	—	147	—	—	—	[3]
Никель	5,8	38	173	328	416	482	592	561	616	[3, 5]
Ниобий	11,3	68	173	239	262	270	281	304	333	[5, 13]
β-Олово белое	40	106	173	206	219	243 (т)	242 (ж)	240	—	[3, 5, 13]
α-Олово серое	32,3	76	136*1	—	—	—	—	—	—	[3]
Осмий	1,43	—	—	—	—	132	136	144	154	[3]
Палладий	9,5	52	132*1	207	238	251	261	281	307	[3]
Платина	7,4	38	88	118	131	136	141	152	165	[3, 5]
Плутоний	15	56	74	94	121	138	154 (т)	171 (ж)	—	[3]

Вещество	Температура, К									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
Празеодим	94,4	174	186	191	193	202	224	286 (т)	305 (ж)	[3]
Рений	2,8	27	75*1	120	132	139	145	158	—	[3, 5]
Родий	2,71	26,6	114	195	234	253	273	310	349	[3, 12]
Ртуть	51,5	89,5	116	129 (т)	142 (ж)	137	137	136	—	[12, 13]
Рутений	1,71	19	99	185	230	241	251	278	315	[3, 12]
Самарий	49	122	204*1	175	188	221	271	301	—	[3]
Свинец	53	94,4	114	122	127	134	144 (т)	142 (ж)	138	[2, 5]
γ-Селен	43,5	108	193*1	274	309	354 (т)	445 (ж)	—	—	[3]
Сера ромбическая	80,6	192	340	517	—	—	—	—	—	[14]
Сера моноклинная*3	—	—	342	535	692 (т)	1004 (ж)	1068	1004	—	[3]
Серебро	15,5	78	166	212	232	239	250	277 (т)	310 (ж)	[3, 5]
Скандий	13,9	95,4	289	—	—	585	611	694	848	[2, 5]
Стронций	54	—	—	—	—	313	343 (α)	441 (γ)	411 (ж)	[2]
Сурьма	25,8	83	147*1	190	204	213	223 (т)	258 (ж)	—	[3]
α-Таллий	50	93	114*1	124	128	134 (т)	145 (ж)	—	—	[3]
Тантал	8,23	43	97,6	126	137	141	145	152	163	[2, 5]
Теллур	33,5	88	151	180	193	219	253 (т)	295 (ж)	—	[3, 5]
Тербий	27,4	106	176*1	234	199	179	188	226	286	[3]
Технеций	—	—	—	—	—	211	225	290	324	[3]
Титан	7,0	57	230	406	498	548	597	684	687	[2, 5]
α-Торий	20	61	90*1	108	115	123	134	156	—	[3]
Туллий	63	187	146*1	154	158	161	163	186	209	[3]
Углерод (алмаз)	0,21	1,18	7,0	83	344	854	1342	1799	—	[2, 3]
Углерод (графит)	6,3	27,9	87*1	269	568	994	1409	1799	2019	[2, 3, 58]
Уран	13,5	54	83*1	103	112	125	146 (α)	180 (β)	201 (ж)	[3]
Фосфор белый	151	303	403	559	728 (т)	843 (ж)	—	—	—	[2]
Фосфор красный	27,3	89	198*1	436	626	748	832	—	—	[3]
Фосфор черный	13,4	73	204*1	447	639	850	—	—	—	[3]
Фтор F_2	347	969 (т)	1502 (ж)	—	—	869 (г)	928	979	1009	[3]
Хлор Cl_2	108	340	543 (т)	—	—	634 (г)	642	627	605	[3]
Хром	2,1	17	127	314	425	482	516	614	806	[2, 5]
Цезий	147	179	192	203	220 (т)	240 (ж)	224	230	273	[9]
Церий	61,5 (β)	—	—	—	—	202 (γ)	223	268 (т)	269 (ж)	[3]
Цинк	26	125	258	293	380	402	436 (т)	480 (ж)	—	[3, 5]
Цирконий	11,7	68	165*1	244	273	300	321	362 (α)	344 (β)	[3]
Эрбий*3	126	144	195	155	165	170	174	192	229	[3]

*1 При T — 75 К.
*2 См. также табл. 9.5.
*3 См. также рис. 9.2—9.10.

Таблица 9.3. **Удельная теплоемкость c_p, Дж/(кг·К) элементов при температуре от 1 до 15 К и давлении 0.1 МПа** (н) — в нормальном (несверхпроводящем) состоянии; (с) — в сверхпроводящем состоянии

Вещество	Температура, К								Литература
	1	2	3	4	5	8	10	15	
α-Азот	—	—	3,5	8,7	17,3	—	167	422	[3]
Алюминий	—	0,11	—	0,30	—	0,9	1,41	4,6	[5]
Аргон	0,06	0,49	—	4,35	—	42,5	83,3	—	[7]
Барий	—	0,12	0,34	0,78	1,54	—	14	38,5	[3]
Бериллий	0,025	0,051	0,079	0,109	0,144	0,27	0,39	0,84	[5]
Бром	—	—	—	—	2	—	16	45	[3]
Ванадий (н)	0,19	0,38	0,58	0,80	1,04	—	2,34	4,24	[3]
Ванадий (с)	0,005	0,2	0,7	1,45	2,43	—	—	—	[3]

Вещество	Температура, К								Литература
	1	2	3	4	5	8	10	15	
Висмут	0,006	0,046	0,17	0,49	—	5,47	10,4	23,8	[12]
пара-Водород	—	4,98	17,4	43	89	450	1030	7100	[12, 13]
Гадолинний	0,08	0,16	0,27	0,4	0,56	—	3,9	12,1	[3]
Галлий	—	0,024	0,051	0,1	0,19	—	3,46	14,8	[3]
Гафний	0,014	0,033	0,06	0,096	0,148	—	—	—	[3]
Гелий (г) ^{4}He	—	—	—	—	6800	5550	5420	5300	[16]
Гелий (ж) ^{4}He	110	5000	3840	4080	—	—	—	—	[4]
Гелий (ж) ^{3}He	1430	2500	—	—	—	—	—	—	[4]
Германий	0,0006	0,0046	0,0155	0,036	0,069	—	0,86	4,43	[3]
Гольмий	18,7	6,24	3,37	2,74	3,22	—	16,4	39,8	[3]
орто-Дейтерий	—	6,5	22,6	55,5	113	545	1130	—	[12]
α-Диспрозий	0,24	0,17	0,22	0,32	0,54	—	3,9	15,5	[3]
Европий	0,24	1,3	2,9	4,9	7,4	—	26	57	[3]
α-Железо	0,09	0,18	0,28	0,38	0,5	0,9	1,24	2,49	[5]
Золото	0,006	0,025	0,07	0,16	0,29	1,2	2,2	7,4	[5]
Индий (н)	0,029	0,138	0,41	0,95	2,27	8,55	15,5	36,7	[5]
Индий (с)	0,019	0,142	0,464	—	—	—	—	—	[12]
Иод	—	—	—	—	2,3	—	16	40	[3]
Иридий	—	0,034	0,053	0,075	0,10	—	0,31	0,83	[3]
Иттербий	0,02	0,087	0,23	0,50	0,98	—	8,5	25,3	[3]
Иттрий	0,10	0,20	0,32	0,46	0,64	1,5	2,6	8,6	[17]
Кадмий	0,008	0,029	0,087	0,234	0,577	3,98	8,62	25,9	[17]
Калий	0,12	—	2,24	5,45	—	42,0	71,5	—	[9]
α-Кальций	0,08	0,18	0,32	0,53	0,86	—	5,3	16,2	[3]
α-Кислород	—	—	—	3,9	7,8	—	69	224	[3]
Кобальт	0,08	0,16	0,25	0,35	0,47	—	1,22	2,53	[3]
Кремний	0,0003	0,002	0,007	0,018	0,03	—	0,28	1,1	[3]
Криптон	0,064	0,53	—	4,82	—	42,0	71,5	—	[7]
Ксенон	0,057	0,49	—	4,74	—	38,1	58,3	103	[7]
α-Лантан (н)	0,07	0,15	0,31	0,54	0,91	—	8,2	25	[3]
α-Лантан (с)	0,006	0,10	0,36	0,83	0,97	—	—	—	[3]
β-Лантан (н)	0,09	0,20	0,38	0,66	1,11	—	—	—	[3]
β-Лантан (с)	0,006	0,08	0,34	0,83	1,56	—	—	—	[3]
Литий	0,24	0,54	0,90	1,39	2,02	—	9,3	25,7	[3]
Лютеций	0,07	0,14	0,22	0,33	0,49	1,43	2,75	—	[3]
Магний	0,055	0,117	0,19	0,29	0,44	1,08	1,9	5,8	[5]
α-Марганец	0,25	0,50	0,75	1,01	1,29	2,16	2,82	5,21	[5]
Медь	0,0116	0,0278	0,0530	0,0916	0,1482	0,4729	0,8709	2,907	[11, 18]
Молибден	0,02	0,04	0,065	0,09	0,13	—	0,48	1,00	[3]
Мышьяк	0,004	0,014	0,04	0,09	0,18	—	1,5	6,1	[3]
α-Натрий	0,08	0,30	0,76	1,6	2,8	—	22,7	74	[3]
β-Натрий	—	—	—	1,78	3,42	—	28,4	85	[3]
Неодим	1,07	5,0	11,0	18,9	27,2	41,5	36,5	51,9	[3]
Неон	0,24	1,96	—	17,7	—	159	278	—	[7]
Никель	0,12	0,24	0,37	0,50	0,67	1,19	1,62	3,1	[5]
Ниобий (н)	0,09	0,18	0,28	0,40	—	1,4	2,2	5,5	[12]
Ниобий (с)	0,001	0,014	0,087	0,27	0,56	2,28	—	—	[19]
α-Олово	0,0002	0,0014	0,005	0,12	0,46	—	6,0	18,9	[3]
β-Олово (н)	0,017	0,047	0,109	0,245	—	4,2	8,1	22,6	[12]
β-Олово (с)	0,004	0,048	0,151	—	—	—	—	—	[12]
Осмий	—	0,025	0,04	0,06	—	—	—	—	[3]
Палладий	0,09	0,18	0,29	0,42	0,56	—	1,9	4,6	[3]
Платина	0,03	0,07	0,12	0,18	0,27	—	1,17	3,5	[3]
α-Плутоний	—	—	—	—	—	—	3	9	[3]
Празеодим	0,35	0,63	1,3	2,4	4,3	18,1	29,2	60	[3]
Рений (н)	0,015	0,025	0,04	0,06	0,08	—	0,29	0,9	[3]
Родий	0,048	0,097	0,147	0,201	—	0,47	0,65	1,35	[12]
Ртуть (н)	0,036	0,48	2,07	4,09	—	17,5	23,5	38	[12]
Ртуть (с)	0,029	0,48	2,09	4,17	—	—	—	—	[12]
Рубидий	0,16	—	4,36	10,4	—	54	81	—	[9]
Рутений	0,03	0,06	0,10	0,13	0,17	—	0,41	0,87	[3]
Самарий	0,14	0,23	0,43	0,78	1,45	—	17,5	37	[3]
Свинец (н)	—	0,094	0,281	0,684	1,48	7,37	13,7	33,5	[5]

Вещество	Температура, К								Литература
	1	2	3	4	5	8	10	15	
Свинец (с)	—	0,067	0,251	0,672	1,51	—	—	—	[20]
γ-Селен	0,007	0,056	0,19	0,49	1,0	—	7,9	23,8	[3]
Сера ромбическая	—	—	—	—	1,69	—	15,4	46	[14]
Серебро	0,0072	0,0239	0,0595	0,124	—	0,91	1,8	6,4	[12]
Скандий	0,267	0,505	0,747	1,00	1,3	2,5	3,31	7,0	[5]
Стронций	0,05	0,14	0,31	0,61	1,09	—	8,45	27	[3]
Сурьма	0,002	0,016	0,055	0,11	0,3	—	3,5	12,3	[3]
Таллий (н)	—	0,06	0,43	1,02	2,0	—	15,3	33	[3]
Тантал (н)	0,032	0,068	0,112	0,171	0,26	0,65	1,17	3,6	[5]
Тантал (с)	0,006	0,054	0,178	0,352	—	—	—	—	[12]
Теллур	0,005	0,039	0,14	0,33	0,65	—	7,01	20,3	[3]
Тербий	1,45	0,50	0,43	0,55	0,68	—	3,7	14,3	[3]
Титан	0,071	0,146	0,226	0,317	0,42	0,84	1,26	3,3	[5]
α-Торий	—	0,05	0,11	0,19	0,42	—	2,9	9,4	[3]
Тулий	0,25	0,38	0,79	1,44	2,35	—	11,6	32,7	[3]
Углерод (графит)	0,003	0,018	0,052	0,11	0,17	—	1,05	3,5	[3, 5]
α-Уран	0,044	0,097	0,17	0,26	0,38	—	1,76	5,9	[3]
α-Фосфор белый	—	—	—	—	3,5	—	36,2	97	[2]
Хлор	—	—	—	—	—	—	20	54	[3]
Хром	0,03	0,06	0,10	0,14	0,18	—	0,49	1,09	[3]
Цезий	0,28	—	8,3	16	—	61	83	—	[9]
α-Церий	0,15	0,33	0,55	0,83	—	—	—	—	[3]
β-Церий	—	1,1	2,3	4,6	7,9	—	43	47	[3]
Цинк	0.01	0,027	0,055	0,105	0,191	0,96	2,36	11,2	[17]
Цирконий	0,03	0,07	0,12	0,18	0,26	—	1,3	4,36	[3]
Эрбий	0,26	0,24	0,38	—	—	—	—	40	[3]

Таблица 9.4. Удельная теплоемкость c_s, кДж/(кг · К), жидкого гелия ^{4}He под давлением насыщенных паров [21] при различной температуре (К)

T, К	c_s	T, К	c_s	T, К	c_s	T, К	c_s	T, К	c_s
1,8	2,81	2,1	7,51	2,4	2,38	3,4	2,97	4,4	5,11
1,85	3,26	2,15	9,35	2,6	2,27	3,6	3,26	4,6	5,94
1,9	3,79	2,17	12,60	2,8	2,34	3,8	3,60	4,8	7,53
2,0	5,18	2,2	3,98	3,0	2,49	4,0	3,99	5,0	11,5
2,05	6,16	2,3	2,64	3,2	2,69	4,2	4,48	5,05	13,5

Таблица 9.5. Зависимость удельной изобарной теплоемкости c_p, кДж/(кг · К), элементов в жидком и газообразном состояниях от давления и температуры

Данные выше жирной горизонтальной черты относятся к жидкой фазе

T, К	Давление, МПа				T, К	Давление, МПа			
	0,1	1	10	100		0,1	1	10	100
Азот N_2 [6]									
70	2,023	2,012	1,903	—	300	1,041	1,056	1,197	1,355
80	1,022	2,089	1,997	—	400	1,045	1,053	1,121	1,271
90	1,068	2,099	1,968	1,701	600	1,075	1,078	1,104	1,201
100	1,069	2,269	1,998	1,774	800	1,122	1,124	1,137	1,198
120	1,057	1,309	2,220	1,685	1000	1,168	1,168	1,176	1,216
150	1,048	1,144	2,851	1,555	1200	1,204	1,204	1,209	1,238
200	1,043	1,083	1,619	1,484	1500	1,244	1,244	1,247	1,266

T, К	Давление, МПа				T, К	Давление, МПа			
	0,1	1	10	100		0,1	1	10	100
				Аргон Ar [7]					
85	1,057	1,055	—	—	200	0,522	0,556	1,232	0,858
100	0,542	1,152	1,093	—	300	0,521	0,532	0,645	0,815
120	0,532	0,722	1,161	0,942	500	0,521	0,521	0,552	0,657
150	0,526	0,609	1,549	0,903	1300	0,521	0,521	0,526	0,556
				н-Водород H_2 [8]					
15	6,98	6,8	—	—	200	13,53	13,59	14,07	14,82
20	9,53	9,17	7,61	—	300	14,31	14,33	14,54	15,14
30	10,83	23,26	10,60	—	600	14,55	14,55	14,59	14,97
50	10,48	12,12	15,53	9,64	1000	14,98	14,98	14,66	15,01
100	11,22	11,50	13,51	12,13	2000	18,27	17,41	17,14	17,04
				пара-Водород H_2 [8]					
15	6,98	6,8	—	—	100	13,43	13,70	15,71	14,34
20	9,53	9,17	7,51	—	200	16,08	16,14	16,52	17,36
25	11,16	12,58	9,12	—	500	14,52	14,53	14,59	14,82
30	10,83	23,26	10,6	—	1000	14,98	14,98	14,99	15,01
50	10,54	12,18	15,59	9,7	2000	18,19	17,33	17,06	16,96

T, К	Давление, МПа								
	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	10	70
				Гелий ^{4}He [16]					
2,5	5,82	2,12	2,10	2,05	1,98	1,80	1,6	—	—
3	5,55	6,08	2,40	2,35	2,28	2,12	1,95	—	—
4	5,35	5,52	6,40	4,08	3,68	3,12	2,72	1,82	—
5	5,28	5,38	5,75	6,78	17,02	4,85	3,70	2,25	—
6	5,25	5,32	5,52	6,00	7,78	9,55	4,80	2,58	—
8	5,22	5,25	5,38	5,55	6,02	8,42	8,20	3,12	—
10	5,22	5,25	5,30	5,42	5,65	6,58	7,62	3,62	—
20	5,20	5,20	5,22	5,25	5,30	5,48	5,72	5,18	3,82
50	5,20	5,20	5,20	5,20	5,22	5,22	5,28	5,60	5,00
100	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,22	5,32	5,45
1400	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	5,20	—

T, К	Давление, МПа				T, К	Давление, МПа			
	0,1	1	10	50		0,1	1	10	50
				Кислород O_2 [10]					
70	1,696	1,694	1,676	1,628	150	0,920	1,039	2,204	1,537
80	1,689	1,687	1,663	1,599	200	0,915	0,957	1,904	1,511
90	1,686	1,681	1,645	1,562	300	0,920	0,934	1,084	1,319
100	0,968	1,709	1,651	1,541	400	0,942	0,949	1,015	1,170
110	0,947	1,780	1,681	1,532	600	1,003	1,006	1,031	—
120	0,935	1,311	1,742	1,531	1000	1,090	1,091	1,099	—

T, K	Давление, МПа				T, K	Давление, МПа			
	0,1	1	10	100		0.1	1	10	100
	Криптон K [7]					*Ксенон* Xe [7]			
120	0,263	0,543	0,531	—	170	0,168	0,348	0,339	—
150	0,258	0,557	0,520	0,441	200	0,165	0,356	0,338	0,294
200	0,252	0,291	0,776	0,502	300	0,160	0,178	0,699	0,286
300	0,249	0,259	0,424	0,404	500	0,159	0,163	0,208	0,248
500	0,248	0,251	0,281	0,353	1000	0,158	0,159	0,167	0,198
1300	0,248	0,248	0,251	0,268	1300	0,158	0,159	0,163	0,183
	Неон Ne [7]								
30	1,129	2,027	1,852	—	70	1,037	1,103	1,973	1,467
40	1,066	1,818	2,030	1,500	100	1,033	1,062	1,339	1,426
50	1,042	1,267	2,557	1,490	200	1,031	1,037	1,089	1,235
60	1,039	1,147	2,603	1,479	1000	1,030	1,030	1,031	1,035

Таблица 9.6. Дебаевский параметр θ, К, и коэффициент электронной теплоемкости γ, мДж/(моль · К²), для элементов [22]

Везде, где возможно, дано значение θ при предельно низкой температуре: обозначения: кр — кристаллический: ам — аморфный

Вещество	θ, К	γ	Вещество	θ, К	γ
Азот [23]	81	0	Кальций	229	2,73
Алмаз	2250	0	α-Кислород [28]	126	0
Алюминий	433	1,35	γ-Кислород [29]	46	0
Америций	121	27	Кобальт	460	4,4
Аргон	92	0	Кремний (кр)	645	0
Барий	111	2,7	Кремний (ам) [27]	528	0
Бериллий	1481	0,17	Криптон	72	0
Бор (кр) [22, 4]	1219—1480	0	Ксенон	64	0
Бор (ам) [4]	1102	0	Кюрий	123	—
Бром [4]	111	0	α-Лантан	150	9,45
Ванадий [29]	382	9,82	β-Лантан	140	11,5
Висмут	120	0,0085	Литий	344	1,65
пара-Водород [12]	122	0	Лютеций	183	8,19
Вольфрам	383	1,01	Магний	403	1,26
Гадолиний	182	6,38	Марганец	409	12,8
Галлий	326	0,60	Медь	347	0,69
Гафний	252	2,15	Молибден	423	1,83
Гелий, г. п. у. [26]	27	0	Мышьяк (кр)	282	0,19
Германий (кр)	373	0	Мышьяк (ам) [27]	159	—
Германий (ам) [27]	315	0	Натрий	156	1,38
Гольмий	190	6 (1)	Неодим	163	—
Графит	413	0,014	Неон	75	0
орто-Дейтерий [12]	114	0	Нептуний	259	1,37
Диспрозий	183	—	Никель	477	7,04
Европий	118	6 (1)	Ниобий	276	7,8
Железо	477	4,9	α-Олово серое [12]	212	0
Золото	162	0,69	β-Олово белое	200	1,78
Индий	112	1,66	Осмий	467	2,05
Иод	109	0	Палладий	271	9,45
Иридий	420	3,14	Платина	237	6,54
Иттербий	118	2,9	Плутоний	206	25 (1)
Иттрий	248	8,2	Празеодим	152	—
Кадмий	210	0,69	Протактиний	185	5
Калий	91	2,08	Рений	418	2,29

Вещество	θ, К	γ	Вещество	θ, К	γ
Родий	512	4,65	Тербнй	176	4,1
Ртуть	72	1,86	Технеций	454	4,0
Рубидий	56	2,63	Титан	420	3,36
Рутений	555	3,1	Торий	160	4,08
Самарий	169	13,5	Тулий	200	—
Свинец	105	2,99	Углерод (алмаз)	2250	0
Селен (кр)	152	0	Углерод (графит)	413	0,014
Селен (ам) [29]	123	0	Уран	248	8,14
Сера [4, 12]	165—180	0	Фтор [4]	78	0
Серебро	227	0,64	Хлор [4]	115	0
Скандий	346	10,3	Хром	606	1,42
Стронций	147	3,64	Цезий	40	3,97
Сурьма	220	0,12	Церий	179	12,8
Таллий	78	1,47	Цинк	329	0,64
Тантал [22, 30]	245	5,4—6,9	Цирконий	290	2,77
Теллур	152	0	Эрбий [22, 31]	188	10

Таблица 9.7. **Зависимость дебаевской функции теплоемкости $D(\theta/T)$ от θ/T** [32]

θ/T	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D(\theta/T)$	1	0,952	0,825	0,663	0,503	0,369	0,266	0.191	0,138	0.101	0.076

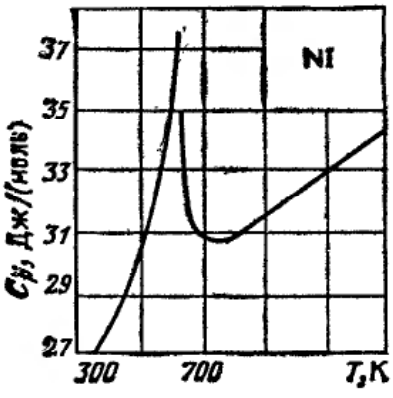


Рис. 9.6. Молярная теплоемкость никеля вблизи ферромагнитного фазового перехода [54]

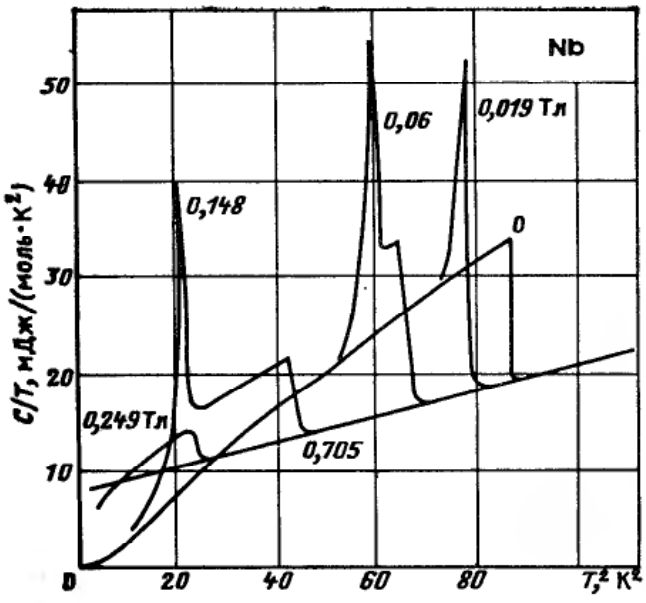


Рис. 9.7. Молярная теплоемкость ниобия при различных значениях магнитной индукции [55]

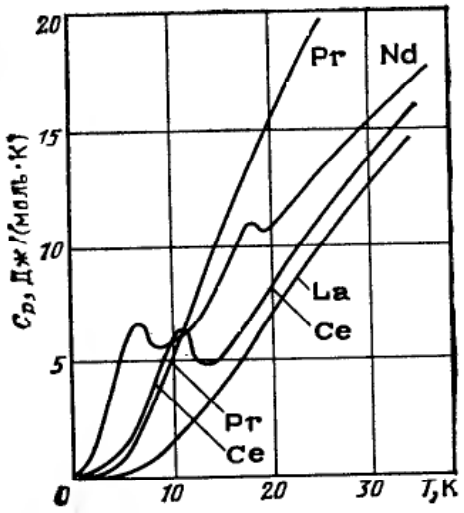


Рис. 9.8. Молярная теплоемкость лантана, неодима, празеодима и церия [4]

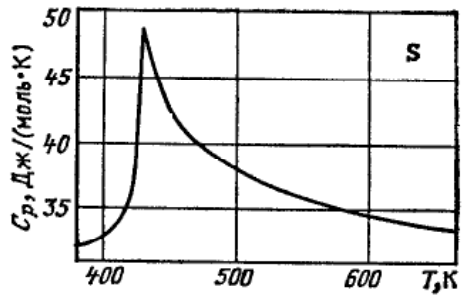


Рис. 9.9. Молярная изобарная теплоемкость жидкой серы [4]

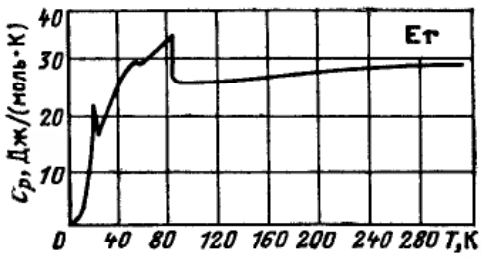


Рис. 9.10. Молярная теплоемкость эрбия [4]

9.3. ТЕПЛОЕМКОСТЬ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В табл. 9.8—9.11 приведены значения теплоемкости для различных неорганических соединений.

Таблица 9.8. **Дебаевский параметр θ, К, и коэффициент электронной теплоемкости γ, мДж/(моль · К²), для неорганических соединений**

Вещество	Формула	θ	γ	Литература
Ванадия галлид	V_3Ga	302	97	[34]
Ванадия германид	V_3Ge	392	30	[35]
Ванадия силицид	V_3Si	501	62	[35]
Галлия антимонид	GaSb	269	0,002	[18]
Галлия арсенид	GaAs	345	0,0008	[18]
Железа сульфид	FeS_2	645	0	[12]
Индия антимонид	InSb	206	0	[18]
Индия арсенид	InAs	251	0	[18]
Калия хлорид	KCl	230	0	[12]
Кальция фторид	CaF_2	475	0	[12]
Лития фторид	LiF	736	0	[12]
Магния оксид	MgO	800	0	[12]
Натрия хлорид	NaCl	275	0	[12]
Ниобия алюминид	Nb_3Al	280	32	[35]
Ниобия станид	Nb_3Sn	228	52	[36]
Рутил	TiO_2	778	0	[37]
Сапфир	Al_2O_3	1042	0	[38]
Серебра бромид	AgBr	144	0	[12]
Серебра хлорид	AgCl	183	0	[12]
Хрома германид	Cr_3Ge	473—670	14—16	[35]
Хрома силицид	Cr_3Si	620—670	10—12	[35]
Цинка сульфид	ZnS	270	0	[12]

Таблица 9.9. **Молярная изобарная теплоемкость C_p, Дж/(моль · К), неоргаиических соединений при температуре 298,15 К [1]**

Твердые тела и жидкости — при давлении 0,1013 МПа, газы — в состоянии идеального газа (г — газ, ж — жидкость)

Вещество и состояние	C_p	Вещество и состояние	C_p
AgBr	52,3	AlF (г) [2]	31,9
AgBr (г)	36,6	AlN [2]	30,1
Ag_2CO_3	112,5	α-Al_2O_3 [2]	79,0
AgCl [4]	50,8	γ-Al_2O_3 [2]	82,7
AgCl (г) [33]	35,8	α-$Al_2O_3 \cdot H_2O$	105,5
$AgClO_2$	87,3	γ-$Al_2O_3 \cdot H_2O$	131,2
AgH (г)	29,3	$Al_2(SO_4)_3$ [2]	259,4
γ-AgI	57,0	Al_2TiO_5	136,4
$AgIO_3$	102,9	$AsCl_3$ (ж)	133,5
AgMg	50,2	AsF_3 (ж)	126,6
$AgNO_2$	79,1	AsF_3 (г)	64,6
$AgNO_3$	102,9	AsH_3 (г)	38,6
Ag_2O	65,9	AsN (г)	30,5
Ag_2S	76,5	As_4O_6	203,8
Ag_2SO_4	131,4	As_2O_5	116,5
Ag_2Se	81,8	$AuSb_2$	79,5
Ag_2Te	88,7	AuSn	50,5
AlBr (г) [2]	35,6	BBr (г) [2]	32,8
$AlBr_3$	100,5	BBr_3 (г) [2]	67,8
Al_4C_3	116,8	B_4C [2]	53,1
AlCl (г) [2]	34,7	BCl (г) [2]	31,7

Продолжение табл. 9.9

Вещество и состояние	C_p	Вещество и состояние	C_p
BCl_3 (г) [2]	62,6	CdI_2	78,7
BF (г) [2]	29,6	CdMg	51,6
BF_3 (г) [2]	50,5	CdO	43,6
BH (г) [2]	29,2	CdS	47,3
B_2H_6 (г) [2]	57,6	α-$CdSO_4$	99,6
$B_{10}H_{14}$	217,9	CdSb	45,7
BN [2]	19,7	$CdSiO_3$	88,6
BN (г) [2]	29,6	CeN	46,4
BO (г)	29,2	CeO_2	61,6
B_2O_2 (г) [2]	60,3	$Ce_2(SO_4)_3$	270,3
B_2O_3 [2]	62,8	Cl_2CO (г) [2]	57,8
$B(OH)_3$	81,3	ClF (г) [2]	32,1
$BACO_3$ [2]	86,0	ClF_3 (г) [2]	64,1
$BACl_2$ [2]	75,1	Cl_2O (г) [2]	47,8
$BaCl_2 \cdot 2H_2O$	203,3	ClO_2 (г) [2]	42
BaF_2 [2]	71,1	$CoCl_2$	78,5
BaH (г)	30,2	CoF_2	68,8
$Ba(NO_3)_2$	151,6	CoO	55,2
BaO [2]	47,0	Co_3O_4	122,8
$BaSO_4$ [2]	102,1	β-$CoSO_4$	103,2
$Ba\ TiO_3$	102,5	Cr_3C_2	85,4
BeH (г) [2]	29,2	$Cr(CO)_6$	240,1
Be_3N_2 [2]	64,8	$CrCl_3$	91,8
BEO [2]	25,6	CrF_3	78,7
$BeSO_4$ [2]	85,7	Cr_2O_3 [2]	128,1
$BiCl_3$	109	CsBr [2]	52,9
Bi_2O_3	113,8	CsCl [2]	52,5
Bi_2Tl	73,6	$CsClO_4$	108,4
BrCl (г) [2]	35,0	CsF [2]	51,1
BrF (г) [2]	33,0	CsH [2]	40,6
BrF_3 (ж)	124,5	CsH (г) [2]	31,6
BrF_3 (г) [2]	67,4	CsI [2]	52,5
BrF_5 (г) [2]	101,3	γ-CuBr	54,7
BrI (г) [2]	36,5	α-CuCl	48,5
CCl_4 (ж)	131,7	α-$CuCl_2$	71,9
CCl_4 (г) [2]	82,9	α-CuI	54,0
CN (г) [2]	29,2	Cu_3N	90,8
C_2N_2 (г) [2]	57,1	CuO	42,3
CO (г) [2]	29,1	Cu_2O	63,6
CO_2 (г) [2]	37,1	CuS	47,8
C_3O_2 (г) [2]	62,2	Cu_2S	76,3
COS (г) [2]	41,6	α-$CuSO_4$	98,9
CP (г) [2]	29,9	Cu_2Sb	76,6
CS (г) [2]	29,8	D_2O [2]	84,3
CS_2 (ж)	75,7	D_2O (г) [2]	34,4
CS_2 (г) [2]	45,5	F_2O (г) [2]	43,5
CaC_2	62,7	Fe_3C	105,8
$CaCO_3$ [2]	83,5	$FeCO_3$	83,3
$CaCl_2$ [2]	72,8	$Fe(CO)_5$ (ж)	240,6
CaF_2 [2]	67,0	$FeCl_2$	76,4
$CaFe_2O_4$	153,6	$FeCl_3$	94,9
α-Ca_3N_2	114,6	$FeCo_2O_4$	143,3
$Ca(NO_3)_2$	149,4	$FeCr_2O_4$	133,7
CaO [2]	42,0	FeF_2	68,1
$Ca(OH)_2$ [2]	82,5	ε-Fe_3N	122,6
$Ca(PO_3)_2$	145,1	FeO	49,9
α-$Ca_3(PO_4)_2$	231,6	α-Fe_2O_3	103,8
β-$Ca_3(PO_4)_2$	236	Fe_3O_4	150,8
CaS [2]	47,4	α-FeS	50,5
$CaSO_3$	91,7	FeS_2	62,2
$CaSO_4$	99,7	FeSi	48,5
α-$CaSiO_3$	85,2	Fe_2SiO_4	132,9
β-Ca_2SiO_4	128,6	$FeTiO_3$	99,5
$CaTiO_3$	97,6	Ga_2O_3 [2]	92,1
$CdCl_2$	76,6	$GeBr_4$ (г) [2]	101,7

Продолжение табл. 9.9

Вещество и состояние	C_p	Вещество и состояние	C_p
GeF_4 (г) [2]	82,0	$KMnO_4$	119,2
GeH_4 (г) [2]	45,0	KNO_3 [2]	95,1
$Ge\ HCl_3$ (г) [2]	54,8	K_2O [2]	72
GeI_4 (г) [2]	104,2	KOH [2]	64,9
GeO_2 [2]	52,1	$KReO_4$	122,6
H_3BO_3 [2]	81,3	K_2SO_4 [2]	131,5
HBr (г) [2]	29,1	La_2O_3 [2]	108,8
HCN (ж)	70,6	$LiAlO_2$	67,8
HCN (г) [2]	35,9	LiBr [2]	49,8
HCl (г) [2]	29,1	LiBr (г) [2]	33,9
HD (г) [2]	37,5	Li_2CO_3	98,3
HF (г) [2]	30,2	LiCl [2]	48,0
HI (г) [2]	28,8	LiCl (г) [2]	33,2
HN_3 (г) [2]	43,2	LiD	34,6
HNO_2 (г) [33]	45,8	LiF [2]	41,8
HNO_3 (ж)	109,9	LiF (г) [2]	31,3
HNO_3 (г)	54,2	$LiFeO_2$	82,8
$HNO_3 \cdot H_2O$	182,4	LiH [2]	29,0
H_2O (ж) [2]	75,3	LiH (г) [2]	29,7
H_2O (г) [2]	33,6	LiI	51,0
H_2O_2 (ж)	89,3	$LiNO_3$	89,1
H_2O_2 (г)	43,1	Li_2O [2]	54,1
HOCl (г)	37,1	LiOH [2]	49,6
H_3PO_4	106,1	$LiOH \cdot H_2O$	79,5
HS (г) [2]	32,5	LiT	37,0
H_2S (г) [2]	34,2	Li_2TiO_3	111
H_2SO_4 (ж)	138,9	MgB_2	47,8
H_2SO_4 (г) [2]	84,4	MgB_4	70,3
$H_2SO_4 \cdot H_2O$ (ж)	214,8	$MgCO_3$ [2]	76,1
H_2Se (г)	34,7	$MgCl_2$ [2]	71,4
H_2Te (г)	35,6	$MgCl_2 \cdot H_2O$	115,3
$HfCl_4$	120,5	$MgCr_2O_4$	126,8
HfO_2 [2]	60,3	MgF_2 [2]	61,6
$HgBr_2$ (г)	76,1	Mg_3N_2	92,1
HgCl (г)	36,4	MgO (г) [2]	32,1
$HgCl_2$ (г)	57,7	MgO [2]	37,2
HgI_2 (красн.)	78,2	$Mg(OH)_2$ [2]	80,7
HgI_2 (г)	61,1	$MgSO_4$ [2]	96,4
HgO	44,1	$MgSiO_3$	81,9
HgS	44,2	$MgSiO_4$	118,7
Hg_2SO_4	132,0	$MgTiO_3$	91,9
IBr (г)	34,5	$MgZn_2$	74,1
ICl	56,2	α-Mn_3C	93,3
ICl (г)	35,6	$MnCO_3$	94,8
IF (г)	33,5	$MnCl_2$	72,9
IrO_2	57,3	MnF_2 (г)	52,7
KBH_4	96,2	MnO	44,1
KBO_2	67,1	β-MnO_2	54,0
KBr [2]	52,5	Mn_2O_3	107,5
KBr (г) [2]	36,9	Mn_3O_4	139,3
$KBrO_3$	104,9	MnS	49,9
KCl [2]	51,3	$MnSO_4$	100,2
KCl (г) [2]	36,5	MnSe	51,3
$KClO_3$	100,3	α-$MnSiO_3$	86,4
$KClO_4$	110,2	MnTe	72,3
K_2CrO_4	146,0	$Mo(CO)_6$	242,2
KF [2]	49,0	MoO_2 [2]	55,9
KH [2]	37,9	MoO_3 [2]	75,1
KH (г) [2]	31,0	α-MoS_2	63,6
KH_2AsO_4	126,7	$MoSi_2$	64,8
α-KHF_2	76,9	Mo_3Si	93,0
KH_2PO_4	116,6	NF_3 (г) [2]	53,5
KI [2]	52,8	NH_3 (г) [2]	35,6
KI (г) [2]	37,1	$NH_3 \cdot 0,5\ H_2O$ (ж)	117,9
γ-KIO_3	106,0	$NH_3 \cdot H_2O$ (ж)	154,9

Продолжение табл. 9.9

Вещество и состояние	C_p
N_2H_4 [2]	48,4
NH_4Cl	84,1
NH_4F [2]	65,3
$(NH_4)H_2PO_4$	142,2
$(NH_4)HSO_4$	135,5
$(NH_4)NO_3$ [2]	139,1
$(NH_4)_2SO_4$	187,4
$(NH_4)VO_3$ [2]	129,3
NO (г) [2]	29,9
NO_2 (г) [2]	37,2
N_2O (г) [2]	38,6
N_2O_4 (г) [2]	79,2
N_2O_5	143,1
N_2O_5 (г) [2]	95,3
NOCl (г)	44,7
NO_2Cl (г)	53,2
NOF (г)	41,3
NS (г) [2]	31,8
$NaAlO_2$	73,3
$NaBH_4$	86,7
$NaBO_2$ [2]	65,9
NaBr [2]	51,4
NaBr (г) [2]	36,3
Na_2CO_3 [2]	112,3
NaCl [2]	50,5
NaCl (г) [2]	35,8
$NaClO_4$	110,4
NaF [2]	46,8
NaH [2]	36,4
NaH (г) [2]	30,2
$NaHCO_3$	88,2
NaI [2]	52,1
NaI (г) [2]	36,6
$NaNO_3$ [2]	93,0
NaO_2 [2]	72,1
Na_2O [2]	69,1
Na_2O_2 [2]	89,3
NaOH [2]	59,5
Na_2SO_3	120,1
Na_2SO_4 [2]	128,0
Na_2SiO_3	111,9
Na_2TiO_3	125,6
θ-NbN	37,5
NBO_2 [2]	57,7
Nb_2O_5 [2]	132,0
Nb_3Sn [39]	72,5
$NiCl_2$	71,7
NiF_2	64,1
NiO	44,3
γ-NiS	47,1
$NiSO_4$	97,7
$NiTe_2$	75,9
NpO_2	66,2
PB_3 (г)	76,1
PCl_3 (г)	71,8
PCl_5 (г) [2]	113,3
PF_3 (г) [2]	58,7
PH_3 (г)	37,1
PN (г) [2]	29,7
P_3N_5	150,6
$POCl_3$ (г) [2]	84,4
$POCl_3$ (ж)	138,8
P_4O_{10}	215,6
P_4O_{10} (г)	191
$PbBr_2$ (ж)	56,9
$PbCl_2$ [2]	77,0
α-PbF_2	72,3
PbO (жел.) [2]	45,8
PbO (красн.) [2]	46,4
PbO (г) [2]	32,5
PbO_2 [2]	61,0
Pb_2O_3 [2]	107,7
Pb_3O_4 [2]	146,7
PbS [2]	49,5
$PbSO_4$	103,2
PtS	43,4
$PtSb_2$	68,6
PuO_2 [2]	66,2
Pu_2O_3 [2]	117,0
RbBr [2]	52,8
RbCl [2]	52,3
$PbClO_3$	103,2
RbF [2]	50,6
RbI [2]	52,6
Rb_2O [2]	74,0
RhO	48,1
Rh_2O	73,2
Rh_2O_3	103,8
SF_6 (г) [2]	97,0
SO (г) [2]	30,2
SO_2 (г) [2]	39,8
SO_3 (г) [2]	50,6
$SOCl_2$ (ж)	120,5
$SOCl_2$ (г)	66,7
SOF_2 (г)	57,1
$SbCl_3$	110,5

Продолжение табл. 9.9

Вещество и состояние	C_p
$SbCl_3$ (г)	77,4
Sb_4O_6 (куб.)	209
Sb_4O_6 (ромб.)	224
Sc_2O_3	94,1
SeF_6 (г)	110,4
SeO (г)	31,1
$SiBr_4$ (г)	97
α-SiC [2]	26,8
β-SiC [2]	26,8
$SiCl_4$ (ж)	145,2
$SiCl_4$ (г)	90,4
SiF_4 (г)	73,6
SiH_4 (г)	42,9
SiO_2 (кварц) [2]	44,6
SiO_2 (стекл.) [2]	44,0
$SnBr_4$ (г)	103,0
$SnCl_2$ [2]	78,0
$SnCl_2$ (г) [2]	54,6
β-$SnNi_3$	99,6
SnO [2]	47,8
SnO (г) [2]	31,8
SnO_2 [2]	53,2
SnPt	50,2
SnS [2]	49,2
Sn S (г) [2]	34,5
Sn S_2	70,1
$SrBr_2$ [2]	76,5
$SrCl_2$ [2]	75,6
$SrCO_3$ [2]	82,4
SrO [2]	45,0
SrO (г) [2]	33,1
$SrSO_4$ [2]	102,0
$SrTiO_3$	98,4
TaC	36,8
TaN	42,7
TeF_6 (г)	117
TeO_2	64
ThF_4	110,7
ThN	45,2
ThO_2 [2]	61,8
TiB_2	45,6
TiC	34,3
TiCl (г)	37,2
$TiCl_2$	69,8
$TiCl_3$	97,1
$TiCl_4$ (ж)	145,2
δ-TiN	37,1
TiO [2]	39,9
TiO_2 (рутил) [2]	55,1
TiO_2 (анатаз) [2]	55,3
Ti_2O_3 [2]	95,8
Ti_3O_5 [2]	150,8
TiS_2	67,9
TlBr	52,5
TlCl [2]	50,9
TlCl (г) [2]	36,4
T lF [2]	53,4
$TlNO_3$	99,6
UCl_3	102,9
UCl_4	122,0
α-UF_4 [2]	116,0
UF_6 [2]	166,8
UF_6 (г) [2]	129,5
β-UH_3	49,3
UO_2 [2]	63,6
UO_3 [2]	81,7
U_3O_8 [2]	238
$UOCl_2$	95,1
UO_2F_2 [2]	103,2
α-V_2C	55,9
VCl_2	72,2
VCl_3	93,2
V_2O_3 [2]	101,0
V_2O_4 [2]	112,1
V_2O_5 [2]	127,8
V_3Si	90,8
α-WC	35,1
WO_3 [2]	79,7
Y_2O_3 [2]	102,5
$ZnCO_3$	80,1
$ZnCl_2$	71,3
α-ZnF_2	65,6
$ZnFe_2O_4$	138,0
ZnO	40,2
ZnS	45,5
α-$ZnSO_4$	99,1
Zn_2SiO_4	123,3
Zn_2TiO_4	137,3
$ZrCl_2$	73,6
ZrN	40,4
Zr_3N_2	127,2
ZrO_2 [2]	55,9
$ZrSiO_4$	98.3

Таблица 9.10. **Молярная изобарная теплоемкость c_p, Дж/(моль · К), неорганических соединений при температуре от 20 до 1500 К и давлении 0,1013 МПа** [2, 4]

Теплоемкость газов дана в состоянии идеального газа, т. е. при предельно низком давлении. Изменение состояния вещества обозначено до и после фазового перехода: т — твердое, ж — жидкое, г — газообразное. Различные кристаллические модификации твердого состояния отмечены греческими буквами α, β, γ и др.

Вещество	Температура, К								
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500
AgBr	—	28,28	42,59	48,87	51,88	58,95	71,84 (т)	37,34 (г)	37,36
AgCl	8,71	22,30	37,95	46,94	50,41	58,86	61,63 (т)	37,24 (г)	37,28
AgI	15,31	28,03	42,72	50,12	53,48	64,68 (т)	—	37,36 (г)	37,38
$AgNO_3$	11,30	27,82	52,59	71,04	86,48	112,3	—	—	—
Ag_2SO_4	12,72	38,49	73,81	99,16	123,5	144	167	—	—
AlBr	—	—	—	—	—	36,40	37,11	37,62	37,98
AlF_3	—	—	17,20	42,76	67,40	86,28	97,31	100,83	105,86
Al_2O_3 (корунд)	0,076	0,691	6,89	31,98	67,01	96,19	112,85	124,53	132,42
Al_2O_3 (сапфир)	0,08	0,71	6,95	31,97	66,90	—	—	—	—
AsF_3	11,40	29,12	48,24	68,58 (т)	—	71,9 (г)	77,2	82,9	—
AsH_3	18,28	44,97	50,28	46,79	90,71 (т)	45,4 (г)	53,1	63,8	75,7
AuCl	—	—	—	—	—	36,28	36,90	37,20	37,28
B_4C	—	—	2,68	14,73	41,13	77,87	96,76	112,33	128,61
BF_3	12,13	29,29	47,20	103,05 (т)	—	57,55 (г)	67,07	75,80	79,50
B_2H_6	5,02	21,30	44,18	75,44 (т)	—	74,07 (г)	101,36	136,44	157,57
BN	0,272	1,08	3,88	8,77	16,33	27,00	35,23	44,31	48,58
B_2O_3	0,23	3,22	15,82	33,15	53,44	78,52	97,83 (т)	130,18 (ж)	128,44
$BaCO_3$	—	—	41,05	64,14	80,21	100,18	111,39	143,97	—
BaF_2	2,51	12,47	35,19	58,49	60,64	75,07	81,67	93,92	—
BaO	—	—	26,78	39,66	46,02	49,96	53,20	57,17	60,55
$BaSO_4$	5,48	21,76	49,25	72,38	93,97	118,76	137,01	161,69	—
$BaTiO_3$	—	—	31,51	66,78	95,48	112,90	121,30	128,1	134,60
BeO	—	—	1,67	7,95	20,46	33,63	42,31	48,72	52,30
Bi_2O_3	—	—	52,72	81,50	107,6	116,90	123,60	—	—
BrF (г)	—	—	—	—	—	34,52	36,15	37,32	37,95
BrF_3 (г)	—	—	—	—	—	72,72	78,03	81,20	—
CO	14,02	34,14 (т)	—	—	—	29,34 (г)	39,44	33,18	35,21
CO_2*	5,13	19,62	35,91	47,72 (т)	—	41,33 (г)	47,33	54,32	58,40
COS	11,00	27,70	40,25	72,33 (т)	—	45,85 (г)	51,16	56,77	59,86
CS_2	11,97	27,82	41,09	55,64	75,27 (т)	49,46 (г)	54,35	58,90	61,04
$CaCO_3$ (кальцит)	—	—	31,80	55,56	75,23	96,98	109,86	124,53	139,30
$CaCl_2$	—	—	40,88	61,30	70,71	75,30	78,81	84,34	—
CaF_2	—	—	20,0	46,19	62,93	74,86	78,35	91,25	125,40
CaO	0,08	1,26	9,71	27,15	41,46	46,98	50,72	53,36	55,10
$Ca(OH)_2$	0,92	5,69	22,84	53,56	79,37	96,04	106,26	121,34	—
$CaSO_4$	—	—	36,90	65,44	90,92	117,02	135,38	159,27	—
$CaTiO_3$	—	—	26,07	59,71	89,16	112,70	123,1	130,3	134,80
$CdCl_2$	7,49	19,75	43,18	63,43	72,30	77,32	85,35	—	—
ClF_3	8,79	25,31	44,89	66,32	114,6 (т)	71,34 (г)	77,19	80,83	82,13
Cl_2O (г)	—	—	—	—	—	49,00	53,1	56,1	57,30
ClO_2 (г)	—	—	—	—	—	45,86	51,13	55,61	57,49
CoF_2	3,28	9,43	25,78	48,03	64,06	—	—	—	—
Cr_3C_2	0,84	3,43	20,92	56,40	88,35	113,1	127,90	147,3	—
CrF_3	3,75	15,29	29,79	51,84	72,68	—	—	—	—
Cr_2O_3	—	—	15,02	51,04	96,9	112,4	122,00	127,4	133,2
CuBr	—	19,50	36,11	46,78	52,79 (т)	36,63 (г)	37,04	37,24	37,31
CuO	0,59	3,51	12,38	26,12	39,11	46,82	50,84	58,87	—
Cu_2O	—	18,95	35,65	47,53	54,90	71,88	76,65	86,19	—
Cu_2S	—	—	42,93	61,92	73,55 (α)	97,28 (β)	97,28	—	—
F_2O (г)	—	—	—	—	—	47,61	52,43	55,86	57,11
Fe_3C	—	—	32,30	66,61	101,5	115,60 (α)	114,7 (β)	119,70	126,0
$FeCl_2$	—	—	42,17	64,10	74,43	79,66	83,09	—	—
Fe_2O_3	0,38	3,99	21,20	56,27	92,22	129,1	140,8 (α)	150,6 (β)	143,7 (γ)
Fe_3O_4	—	—	37,45	92,76	131,8	172,2	212,5 (α)	200,8 (β)	200,8
FeS	1,1	6,99	20,9	36,12	47,11	65,9 (α)	57,02 (γ)	61,00	—
Ga_2O_3	0,46	5,56	23,47	53,30	81,92	105,53	116,78	126,98	135,78

Вещество	Температура, К								
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500
GeF_4	—	—	—	—	—	90,03	98,61	104,34	106,37
HBr	11,05	20,50	39,33	46,88 (т)	—	29,21 (г)	29,87	32,33	34,74
HCN	3,49	12,48	28,52	42,32	60,84 (т)	39,42 (г)	44,19	50,79	56,40
HCl	5,86	15,69	27,99 (т)	—	—	29,16 (г)	29,71	31,76	—
HF	2,51	9,04	16,95	25,57 (т)	—	29,19 (г)	29,23	30,17	32,33
HI	14,14	23,26	37,40	45,58 (т)	—	29,29 (г)	30,12	32,34	35,27
HNO_3	5,18	18,69	36,92	51,76	111,5 (т)	63,40 (г)	—	—	—
H_2O*1	1,98	6,12	12,82	21,95	34,71 (т)	34,16 (г)	36,29	41,54	—
H_2O_2	1,23	6,90	20,48	35,31	51,46 (т)	46,48 (г)	53,52	62,62	—
H_3PO_4	4,23	16,4	35,5	60,2	91,3	—	—	—	—
H_2S	5,23	14,90	30,59	56,32 (т)	—	35,66	39,05	45,97	51,78
H_2SO_4	7,24	21,84	39,37	59,79	88,58	—	—	—	—
H_2Se	—	—	37,7	54,85 (т)	—	36,28	40,21	47,24	—
HIO_2	—	—	—	—	—	66,97	73,13	79,73	86,13
HgCl	8,03	29,00	37,53	44,64	49,45 (т)	36,74 (ж)	37,11	37,28	37,36
HgO (красная)	5,44	15,02	25,32	31,40	41,45	—	—	—	—
IBr (г)	—	—	—	—	—	36,99	37,40	37,78	38,07
ICl (г)	—	—	—	—	—	36,40	37,11	37,66	37,99
KBr	6,94	23,18	39,92	47,94	50,88	53,32	56,64	64,62	—
KCl	2,84	15,64	34,48	45,18	49,88	52,98	55,89	64,03	—
KF	1,16	7,92	25,48	40,71	47,70	51,72	55,29	60,99	—
KH_2PO_4	3,21	17,67	46,36	75,06	104,0	—	—	—	—
$KMnO_4$	12,89	35,23	61,92	87,86	110,6	—	—	—	—
K_2SO_4	—	—	68,24	96,86	120,5	146,84	174,46	—	—
Li_2CO_3	0,96	6,74	26,07	55,56	85,77	—	—	—	—
LiF	0,08	0,75	7,78	24,85	38,07	46,38	51,57	59,18	—
Li_2O	0,063	0,54	5,61	24,45	46,93	63,98	73,23	88,73	117,4
$MgCO_3$	—	—	15,82	43,85	68,62	89,87	107,70	135,88	—
$MgCl_2$	—	—	31,34	55,44	68,16	75,62	79,85	—	—
MF_2	—	—	14,77	37,66	56,48	69,75	75,94	80,31	83,20
MgO	0,088	0,53	4,54	18,73	33,30	42,77	47,30	50.87	53,34
$Mg(OH)_2$	0,34	2,83	13,74	40,96	68,78	81,00	94,22	—	—
α-Mn_3C	—	—	31,38	62,84	86,61	104,4	115,0	127,4	—
$MnCl_2$	—	—	38,50	60,58	70,71	77,15	81,84	—	—
MnF_2	4,97	17,02	29,6	49,1	64,1	—	—	—	—
MnO	—	—	21,80	33,14	41,51	47,45	50,33	54,14	58,49
Mn_2O_3	—	—	41,84	61,84	93,72	109,0	120,8	137,2	—
MnS	—	—	33,14	49,16	48,95	50,71	52,22	55,23	58,99
MoO_3	1,63	6,99	23,77	47,70	67,99	82,56	92,27	107,63	—
Mo_3Si	—	—	34,12	69,02	88,57	97,02	102,3	110,7	120,5
NH_3*1	1,54	7,61	20,77	38,65 (т)	—	38,67	45,23	56,24	65,94
N_2H_4	1,46	8,91	24,96	42,03	59,75 (т)	63,2 (г)	76,5	93,3	107
$NH_4H_2PO_4$	4,18	17,77	46,53	131,80	125,20	—	—	—	—
NH_4O_3	4,21	20,07	48,74	82,92	128,13	—	—	—	—
NO	7,03	17,28	30,21 (т)	—	—	29,95 (г)	31,24	33,99	35,79
N_2O	6,32	21,46	37,45	51,06 (т)	—	42,87 (г)	48,86	56,02	60,45
N_2O_4	8,49	28,70	52,55	76,82	107,20 (т)	90,46 (г)	105,45	118,6	124,0
N_2O_5 (г)	—	—	—	—	—	106,8	121,9	136,4	143,0
$NaBH_4$	1,59	10,54	31,71	57,86	80,00	94,56	108,6	—	—
NaCl	1,42	10,04	29,37	44,10	48,86	51,92	55,53	65,52	—
NaF	—	—	16,15	34,23	44,43	51,03	54,58	61,35	—
$NaNO_3$	3,77	17,32	43,56	66,02	84,22	113	—	—	—
Na_2O	—	—	—	—	—	73,93	80,64	91,85	—
NaOH	—	—	20,67	41,30	55,44	66,64	86,04	84,57	84,56
Na_2SO_4	2,43	17,06	53,39	89,70	117,6	145,3	176,88	209,0	—
Na_2SiO_3	—	—	36,15	73,26	102.2	130,6	148,0	168,9	—
Na_2TiO_3	—	—	34,64	78,16	114,4	140 (α)	151,3 (β)	179,7	—
Nb_3Al [39]	3,08	17,44	47,84	76,24	91,32	100.1	—	—	—
Nb_3Sn [39]	5,04	22,84	56,28	81,60	93,80	99,80	—	—	—
$NiCl_2$	3,29	13,08	35,19	57,66	69,04	75,40	79,79	85,94	—
NiO	—	—	9,25	24,89	39,41	52,13 (α)	51,84 (γ)	55,23	59,45
PH_3	10,29	40,88	50,46	60,51 (т)	—	41,80 (г)	50,92	64,31	72,84

Вещество	Температура, К								
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500
$PbCl_2$	12,55	33,64	55,40	67,95	74,98	80,72	85,73	—	—
PbO (красная)	—	—	22,94	34,70	43,45	48,73	52,92	—	—
PbO (желтая)	—	—	23,82	35,20	43,57	—	—	57,95	—
RbI	15,06	34,73	46,02	50,38	52,30	53,5	57,35	—	—
SF_6	22,64	42,93	60,63	75,13 (т)	—	117,9 (г)	133,5	147,2	158,1
SO_2	6,95	24,18	43,18	57,53	86,65 (т)	43,47 (г)	48,99	54,52	57,11
Sb_2O_4	—	—	37,99	72,26	106,9 (т)	121,7 (ж)	135,2	162,3	—
SeF_6 (г)	—	—	—	—	—	127,9	141,3	150,7	156,6
SiC	—	—	2,38	10,00	22,07	34,19	41,24	47,72	51,26
SiH_4	9,41	26,19	51,46	61,35 (т)	—	51,42 (г)	65,84	84,49	95,46
SiO_2 (кварц) [2, 4, 33]	1,00	3,93	11,92	24,94	39.33	53,42	64,52	68,94	74,00
SiO_2 (кристобалит) [33]	—	—	12,05	25,02	39,29	53,14	65,35	72,97	73,05
SiO_2 (тридимит) [33]	—	—	12,47	25,52	39,79	61,50	63,68	68,12	73.64
SnO_2	—	—	15,48	32,89	49,08	65,09	74,28	81,18	86,10
SnS	—	—	29,29	41,76	47,82	51,00	56,08 (т)	56,57 (ж)	74,90
$SrCO_3$	—	—	34,77	59,77	75,65	97,09	106,29	125,75	—
SrO	—	—	18,20	34,31	43,26	48,45	52,04	56,31	60,14
$SrSO_4$	2,88	16,31	43,91	69,81	92,99	117,94	135,91	161,00	—
TaC	—	—	15,65	24,18	33,43	—	—	—	—
ThO_2	—	—	—	—	—	67,69	72,74	77,61	82,29
TiC	—	—	4,23	15,73	29,37	41,46	47,32	51,34	53,85
$TiCl_4$ (г)	—	—	25,02	49,12	64,10	100,8	104,3	106,5	107,6
TiO	—	—	8,54	22,89	36,07	46,58	50,73	57,76	—
Ti_2O_3	—	—	17,03	51,46	87,45	119,24	136,38	143,47	158,02
UCl_3 [33]	—	—	—	—	—	97,15	105,1	115,2	118,4
UF_4	5,13	20,49	53,14	89,39	111,90	121,75	125,80	133,38	—
UF_6	17,0	40,31	80,32	118,3	152,40 (т)	139,80 (г)	148,98	154,54	156,42
UO_2	4,19	11,03	23,28	42,13	59,25	73,43	79,13	82,70	90,97
VC	—	—	6,99	18,37	29,71	43,51	48,49	53,64	58,53
V_3Ga [40]	—	—	43,7	72,4	89,8	109,6	—	—	—
V_3Ge [41]	1,62	9,44	40,0	74,16	90,52	—	—	—	—
V_2O_3	—	—	18,20	60,54	95,48	117,05	127,46	133,09	139,29
V_3Si [41]	1,72	7,6	32,9	66,3	85,9	—	—	—	—
WC [33]	—	—	—	—	—	37,03	38,83	42,47	47,03
WO_3 [4, 33]	—	—	24,43	49,92	73,39	83,62	—	—	—
ZnF_2	0,98	6,95	23,86	46,44	61,76	—	—	—	—
ZnO	—	—	—	25,86	37,03	45,33	49,50	53,18	56,23
ZnS	1,67	8,20	19,83	34,43	43,26	49,41	52,38	55,48	—
ZrN	—	—	15,82	24,69	36,78	44,77	48,66	52,76	—
ZrO_2	—	—	13,05	32,30	50,58	63,56	70,04	76,07	78,1

*1 См. также табл. 9.11.

Таблица 9.11. **Зависимость удельной изобарной теплоемкости c_p, кДж/(кг · К). аммиака, воды, водяного пара и углекислого газа от давления и температуры**

Данные выше жирной горизонтальной черты относятся к жидкой фазе, ниже — к газообразной

T, К	Давление, МПа				T, К	Давление, МПа			
	0,1	1	10	50		0,1	1	10	50
Аммиак NH_3 [42]									
200	4,42	4,42	4,40	4,32	400	2,29	2,45	22,3	4,71
230	4,46	4,46	4,43	4,33	500	2,47	2,53	3,41	6,14
250	2,18	4,51	4,47	4,34	600	2,66	2,69	3,05	4,78
300	2,15	2,94	4,64	4,35	750	2,92	2,94	3,08	3,70

T, К	t, °С	Давление, МПа							
		0,1	1	2	5	10	20	50	100
Вода и водяной пар H_2O [43]									
273,15	0	4,217	4,212	4,207	4,196	4,165	4,117	3,993	3,890
323,15	50	4,181	4,179	4,176	4,170	4,158	4,137	4,080	4,038
373,15	100	2,038	4,213	4,211	4,205	4,194	4,173	4,117	4,071
423,15	150	1,979	4,308	4,305	4,296	4,281	4,252	4,178	4,121
473,15	200	1,974	2,433	4,494	4,477	4,450	4,402	4,284	4,200
523,15	250	1,988	2,212	2,580	4,854	4,791	4,684	4,463	4,328
573,15	300	2,011	2,141	2,321	3,199	5,70	5,33	5,788	4,538
623,15	350	2,038	2,125	2,235	2,670	4,043	8,10	5,45	4,897
633,15	360	2,044	2,127	2,231	2,625	3,769	11,37	5,64	4,984
643,15	370	2,050	2,128	2,222	2,578	3,546	18,38	5,84	5,06
653,15	380	2,056	2,127	2,212	2,528	3,356	10,19	6,10	5,18
663,15	390	2,061	2,125	2,202	2,486	3,201	7,65	6,43	5,29
673,15	400	2,068	2,126	2,197	2,451	3,078	6,33	6,81	5,39
723,15	450	2,099	2,141	2,191	2,360	2,726	3,959	9,48	5,94
773,15	500	2,132	2,164	2,201	2,324	2,569	3,257	7,20	6,42
873,15	600	2,200	2,219	2,240	2,311	2,445	2,770	4,082	5,01
973,15	700	2,270	2,283	2,299	2,346	2,429	2,613	3,279	3,881
1073,15	800	2,341	2,352	2,364	2,401	2,465	2,598	3,024	3,415

T, К	Давление, МПа				T, К	Давление, МПа			
	0,1	1	10	100		0,1	1	10	100
Углекислый газ CO_2 [44, 45]									
220	0,786	1,820	1,745	—	350	0,900	0,936	1,930	1,561
240	0,798	1,018	1,864	1,466	400	0,941	0,966	1,327	1,530
260	0,814	0,945	2,039	1,609	600	1,077	1,084	1,161	1,422
280	0,832	0,920	2,273	1,648	1000	1,234	1,236	1,254	—
300	0,852	0,916	2,977	1,630	1500	1,327	1,328	1,334	—

9.4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

В табл. 9.12 — 9.14 приведены значения теплоемкости различных органнческих соединений.

Таблица 9.12. **Молярная изобариая теплоемкость C_p, Дж/(моль · К) органических соединений при температуре 298,15 К** [4]

Жидкости и твердые тела — при давлении 0,1013 МПа, газы — в состоянии идеального газа (т. е. при предельно низком давлении): г — газ; ж — жидкость; тв — твердый

Вещество, формула, состояние	C_p
Азулен $C_{10}H_8$ (г]	128,4
Анилин C_6H_7 (ж)	191
Ацетальдегид C_2H_4O (г)	56,6
Ацетон C_3H_6O (ж)	125
Ацетон C_3H_6O (г)	74,9
Бензол C_6H_6 (ж)	136,1
Бензол C_6H_6 (г)	81,7
Бромбензол C_6H_5Br (ж)	155,4
Бромметан CH_3Br (г) [2]	42,4
1,3-Бутадиен C_4H_6 (г)	79,5
Бутан C_4H_{10} (г)	98,7
1-Бутанол $C_4H_{10}O$ (ж)	179
1-Бутен, C_4H_8 (г)	89,3
Бутилбензол $C_{10}H_{14}$ (ж) [21]	175
1-Бутин C_4H_6 (г)	81,4
2-Бутин C_4H_6 (ж)	125,1
2-Бутин C_4H_6 (г)	78,0
Гексан C_6H_{14} (ж)	195
Гексан (г) C_6H_{14} (г)	146,7
Гексанол $C_6H_{14}O$ (ж)	238
Гексахлорбензол C_6Cl_6 (ж)	201,4
1-Гексен C_6H_{12} (ж)	183,3
1-Гексен C_6H_{12} (г)	138,4
1-Гексин C_6H_{10} (г)	130,5
Гептан C_7H_{14} (ж)	224,7
Гептан C_7H_{14} (г)	170,7
Глицерин $C_3H_8O_3$ (ж) [21]	217
Глицин $C_2H_5O_2N$ (кр)	100,3
Декан $C_{10}H_{22}$ (ж)	314,5
Декан $C_{10}H_{22}$ (г)	243.1
Дибромметан CH_2Br_2 (ж) [2, 4]	127,4
Дибромметан CH_2Br_2 (г) [2,4]	54,5
1,2-Дибромэтан $C_2H_4Br_2$	136,0
2,2-Диметилпропан C_5H_{12} (г)	121,6
1,4-Диоксан $C_4H_6O_2$ (ж) [33]	152,9
Дифторбромметан CHF_2Br (г) [2]	58,8
Дифтордибромметан CF_2Br_2 (г)	77,0
Дифтордихлорметан CF_2Cl_2 (г)	72,3
Дифторметан CH_2F_2 (г) [2]	42,9
Дифторхлорбромметан CF_2ClBr (г)	74,6
Дифторхлорметан CHF_2Cl (г) [2]	55,8
Дихлорметан CH_2Cl_2 (ж) [2, 4]	100
То же (г)	50,9
1-1-Дихлорэтан $C_2H_4Cl_2$ (ж)	126,3
1,1-Дихлорэтан $C_2H_4Cl_2$ (г)	76,2
1,1-Дихлорэтен $C_2H_2Cl_2$ (ж)	111,3
1,1-Дихлорэтен $C_2H_2Cl_2$ (г)	67,0
Дифениловый эфир $C_{12}H_{10}O$, (тв)	216,6
Диэтиловый эфир C_2H_6O (г)	65,9
Иодметан CH_3I (ж) [2, 4]	127,2
Иодметан CH_3I (г) [2, 4]	44,1
Кетен C_2H_2O (г)	47,9
орто-Ксилол C_8H_{10} (ж) [21]	183
Кумол C_9H_{12} (ж) [21]	189

Продолжение табл. 9.12

Вещество, формула, состояние	C_p
Кумол C_9H_{12} (г) [21]	134
Метан*1 [2] CH_4 (г) [2]	35,7
Метанол CH_4O (ж) [2, 4]	81,6
Метанол CH_4O (г) [2, 4]	44,1
Метантиоль CH_4S (г)	50,7
Метиламин CH_5N (г)	51,7
2-Метил-1,3-бутадиен C_5H_8 (ж)	154,6
То же (г)	104,6
2-Метилбутан C_5H_{12} (ж)	164,9
То же (г)	120,6
2-Метил-1-бутен C_5H_{10} (ж)	157,2
То же (г)	111,6
3-Метил-1-бутин C_5H_8 (г)	104,7
2-Метиопропан C_4H_{10} (г)	96,8
2-Метил-1-пропен C_4H_8 (г)	89,1
Метилциклопентан C_6H_{12} (ж)	158,7
То же (г)	109,8
Муравьиная кислота CH_2O_2 (ж) [2, 4]	158,7
То же (г)	109,8
Нафталин $C_{10}H_8$ (тв)	165,7
Нафталин $C_{10}H_8$ (г)	134,2
Нонан C_9H_{20} (ж)	284,4
Нонан C_9H_{20} (г)	219
Октан C_8H_{18} (ж)	254,1
Октан C_8H_{18} (г)	194,9
1-Октен C_8H_{16} (ж)	241,2
1-Октен C_8H_{16} (г)	186,6
Пентан C_5H_{12} (ж)	171,5
Пентан C_5H_{12} (г)	122,6
1-Пентанол $C_5H_{12}O$ (ж)	209,2
1-Пентен C_5H_{10} (ж)	155,3
1-Пентен C_5H_{10} (г)	114,6
1-Пентин C_5H_8 (г)	106,7
Пропадиен C_3H_4 (г)	59,0
Пропан*1 C_3H_8 (г)	73,5
1-Пропанол C_3H_8O (ж)	148,6
Пропен C_3H_6 (г)	63,6
Пропин C_3H_4 (г)	60,7
Стирол C_8H_8 (ж)	182,9
Стирол C_8H_8 (г)	122,1
Тетрабромметан CBr_4 (тв)	128,0
То же (г)	91,2
Тетрафторметан CF_4 (г)	61,1
Толуол C_7H_8 (ж) [4, 21]	154—166
Толуол C_7H_8 (г) [4, 21]	103 6
Трибромметан $CHBr_3$ (ж)	134,8
То же (г)	71,1
2,2,4-Триметилпентан C_8H_{18} (ж)	239,5
Трифторбромметан CF_3Br (г) [21]	69,3
Трифторметан*1 CHF_3 (г)	51,1
Трифторхлорметан CF_3Cl (г)	66,9
Трифторхлорэтаи $C_2H_2F_3Cl$ (г) [2]	51,0
Трихлорметан $CHCl_3$ (ж) [2, 4]	116,3
То же (г)	66,8
1,2,2-Трифтор-1,1,2-трнхлорэтан $C_2F_3Cl_3$ (ж)	176
То же (г)	116
Углерод четыреххлористый CCl_4 (ж)	131,7
То же (г)	82,9
Уксусная кислота, мономер $C_2H_4O_2$ (ж)	123,4
То же (г)	66,5
Фенол C_6H_6O (тв)	134,7
Формальдегид CH_2O (г) [2]	35,4
Фосген $COCl_2$ (г) [2]	58,0
Фторбензол C_6H_5F (ж)	146,4
То же (г)	94,4

Продолжение табл. 9.12

Вещество, формула, состояние	C_p
Фторбромметан CH_2FBr (г) [2]	49,1
Фтордихлорметан $CHFCl_2$ (г)	61,0
Фторметан CH_3F (г) [2]	37,5
Фтортрибромметан $CFBr_3$ (г) [2]	84,2
Фтортрихлорметан $CFCl_3$ (г)	78,1
Фторхлорметан CH_2FCl (г)	47,0
Фторэтан CH_5F	58,6
Фуран C_4H_4O (ж)	114,6
То же (г)	65,4
Хлорбензол C_6H_6Cl (ж)	150,1
То же (г)	97,1
Хлорметан CH_3Cl (г)	40,7
2-Хлорпропан C_3H_7Cl (г)	87,6
Хлорэтан C_2H_5Cl (г)	62,3
Хлорэтен C_2H_3Cl (г)	53,7
Циклобутан C_4H_8 (г)	72,2
Циклобутен C_4H_6 (г) [33]	67,1
Циклогексан C_6H_{12} (ж)	156,5
То же (г)	106,3
Циклогексен C_6H_{10} (ж)	140,2
То же (г)	105,0
Циклопентан C_5H_{10} (ж)	126,8
То же (г)	82,9
Циклопентен C_5H_8 (ж)	122,4
То же (г)	75,1
Циклопропан C_3H_6 (г)	55,9
Этан* C_2H_6 (г)	52,5
Этанол C_2H_6O (ж) [2,4]	111,4
То же (г)	65,8
Этантиоль C_2H_6S (ж)	117,8
То же (г)	72,7
Этен* C_2H_4 (г) [2]	42,9
Этилацетат $C_4H_8O_2$ (ж)	170
Этилбензол C_8H_{10} (ж)	186
То же (г)	128
Этилена оксид C_2H_4O (г)	48,5
Этиленгликоль $C_2H_6O_2$ (ж)	151
Этин C_2H_2 (г) [2]	44,0

* См. также табл. 9.14.

Таблица 9.13. **Молярная изобарная теплоемкость C_p, Дж/(моль·К), органических соединений при температуре от 20 до 1500 К** [33]

Верхняя шкала температур относится к конденсированному состоянию, нижняя — к газу (г — газ; к — конденсат)

Вещество и состояние	Температура, К			
	к: 20	40	80	150
	г: 400	600	1000	1500
Азулен (г)	176,4	248,2	327,4	—
Ацетальдегид (г)	65,81	85,86	112,8	—
Ацетон (к)	10,3	30,2	56,8	83,2
Ацетон (г)	92,05	122,8	163,8	191,3
Бензойная кислота (к) [61]	11,24	32,18	56,77	84,14
Бензол (к)	8,37	26,53	44,93	64,64
Бензол (г)	111,9	157,9	209,9	241,3
Бромметан (к)	10,71	26,24	45,15	56,23

Продолжение табл. 9.13

Вещество и состояние	Температура, К			
	к: 20	40	80	150
	г: 400	600	1000	1500
Бромметан (г)	49,92	62,63	79,50	91,25
Бутан (к)	4,52	27,45	55,65	115,1
Бутан (г)	124,7	169,1	226,8	265,7
1-Бутен (к)	8,21	28,48	53,89	105,4
1-Бутен (г)	112,7	149,9	197,7	229,8
Гексан (к)	10,84	34,64	70,08	109,0
Гексан (г)	184,3	248,4	330,3	385,0
Диметиловый эфир (к)	8,20	24,89	47,91	98,91
Дифтордибромметан (г)	85,60	95,35	102,8	—
Дифтордихлорметан (г)	98,66	112,0	123,4	128,3
Дихлорэтан (к)	12,26	32,55	54,02	91,21
Дихлорэтан (г)	92,22	112,4	138,3	155,3
Кетен (к)	56,15	69,58	83,81	93,93
орто-Ксилол (к)	11,00	31,80	60,38	96,06
орто-Ксилол (г)	171,7	234,2	311,1	359,5
Метан* (к) [33, 47]	—	28,66	40,58	—
Метан* (г) [33, 47]	40,6	52,49	72,80	86,7
Метанол	5,86	18,33	37,66	55,65
Метанол (г)	51,42	67,03	89,45	—
Муравьиная кислота (к)	4,10	14,16	29,43	44,14
То же (г)	56,96	69,66	89,68	94,27
Нафталин (к)	9,37	30,12	51,99	81,75
Нафталин (г)	180,7	250,8	328,8	374,4
Пентан (к)	10,25	31,00	62,84	140,6
Пентан (г)	154,4	208,7	278,5	325,3
1-Пентен (к)	10,54	32,93	61,92	129,2
1-Пентен (г)	143,1	189,8	249,4	289,4
Пропан* (к) [33, 48]	6,66	25,08	50,38	89,03
Пропан (г) [33, 48]	94,0	129,2	175,0	206,1
Пропен (к)	9,58	28,95	53,51	87,11
Пропен (г)	79,91	107,5	144,2	169,0
2-Пропанол (к)	8,41	24,7	46,1	74,1
Стирол (к)	11,71	32,28	56,19	90,75
Стирол (г)	160,3	218,2	284,2	324,6
Тетрафторметан (к)	20,29	42,80	67,36	—
То же (г)	72,63	87,03	98,95	—
Толуол (г)	139,1	194,9	260,2	300,3
Трифторметан* (г)	61,04	75,86	90,92	—
Трифторхлорметан (г)	77,59	90,37	100,5	104,5
Уксусная кислота (к)	—	—	—	59,5
То же (г)	81,67	105,2	133,8	152,5
Формальдегид (г)	39,19	48,10	61,90	71,10
Фтордихлорметан (г)	70,08	82,47	94,22	100,5
Фторметан (г)	44,02	57,74	77,11	90,21
Фтордихлорметан (к)	21,40	40,05	55,35	83,89
То же (г)	87,04	96,66	103,4	105,9
Хлорметан (к)	6,28	22,51	42,38	62,34
То же (г)	48,12	61,25	78,91	91,00
Четыреххлористый углерод (к)	21,33	40,92	58,91	84,89
То же (г)	91,71	99,66	104,8	—
Этан* (к) [33, 49]	6,42	24,87	53,22	71,0
Этан* (г) [33, 49]	65,65	89,3	122,7	146,0
Этанол кристаллический (к)	7,155	17,25	40,80	—
Этанол аморфный (к)	8,290	24,07	46,38	—
Этанол (г)	87,56	112,2	145,0	167,7
Этен* (к)	6,36	23,70	48,33	66,78
Этен (г)	53,12	71,55	94,43	110,29
Этин (г)	50,10	57,44	66,62	74,07

* См. также табл. 9.14.

Таблица 9.14. **Зависимость удельной изобарной теплоемкости c_p, кДж/(кг · К), органических жидкостей и газов от давления и температуры**

Данные выше жирной горизонтальной черты относятся к жидкой фазе

T, К	Давление, МПа				T, К	Давление, МПа			
	0,1	1	10	20		0,1	1	10	20
Дифторхлорметан (фреон-22) CHF_2Cl [46]									
273,15	0,621	1,161	1,125	1,105	403,15	0,768	0,807	2,169	1,334
303,15	0,657	0,842	1,166	1,114	453,15	0,813	0,830	1,422	1,465
353,15	0,720	0,804	1,378	1,225	473,15	0,830	0,841	1,228	1,454

Продолжение

T, К	Давление, МПа				T, К	Давление, МПа			
	0,1	1	10	100		0,1	1	10	100
Метан CH_4 [47]									
100	3,258	3,255	3,226	—	200	2,106	2,294	5,321	2,962
110	3,390	3,379	3,289	—	300	2,236	2,290	3,018	3,047
120	2,192	3,549	3,431	3,046	400	2,534	2,559	2,808	3,149
130	2,163	3,683	3,523	3,202	600	3,273	3,282	3,367	3,612
140	2,141	3,822	3,580	3,230	800	3,959	3,964	4,006	4,175
150	2,125	2,941	3,644	3,187	1000	4,539	4,542	4,568	4,691

Продолжение

T, К	Давление, МПа				T, К	Давление, МПа			
	0,1013	1	10	70		0,1013	1	10	70
Пропан C_3H_8 [48]									
90	1,911	1,911	1,908	—	300	1,696	2,751	2,556	2,317
100	1,923	1,922	1,919	1,903	350	1,916	2,050	3,012	2,544
150	1,998	1,997	1,988	1,953	400	2,136	2,209	3,915	2,795
200	2,125	2,122	2,099	2,028	500	2,552	2,586	3,238	3,052
250	1,496	2,336	2,277	2,145	700	3,239	3,252	3,394	3,573

Продолжение

T, К	Давление, МПа				T, К	Давление, МПа			
	0,1	1	10	20		0,1	1	10	20
Трифторметан (фреон-23) CHF_3 [46]									
233,15	0,663	0,824	0,727	0,661	353,15	0,812	0,856	1,973	1,581
253,15	0,683	0,890	1,195	1,112	403,15	0,879	0,904	1,298	1,510
303,15	0,745	0,828	1,796	1,421	453,15	0,940	0,956	1,162	1,343

T, K	Давление, МПа				T, K	Давление, МПа			
	0,1	1	10	70		0,1	1	10	70
Этан C_2H_6 [49]									
120	2,296	2,293	2,274	2,250	220	1,511	2,607	2,500	2,301
140	2,356	2,354	2,335	2,277	240	1,561	2,834	2,633	2,360
160	2,362	2,359	2,332	2,222	300	1,765	1,910	3,457	2,527
180	2,392	2,387	2,347	2,205	400	2,182	2,227	3,211	2,838
200	1,476	2,467	2,404	2,243	500	2,597	2,620	2,914	3 136

Продолжение

T, K	Давление, МПа				T, K	Давление, МПа			
	0,1	1	10	100		0,1	1	10	100
Этилен C_2H_4 [50]									
130	2,400	2,398	2,382	2,354	300	1,544	1,639	4,299	2,279
150	2,381	2,379	2,346	2,186	350	1,716	1,767	3,308	2,367
200	1,321	2,529	2,424	2,190	400	1,894	1,927	2,510	2,456
250	1,397	1,644	2.773	2,209	450	2,067	2,091	2,414	2,547

9.5. ТЕПЛОЕМКОСТЬ РАСТВОРОВ, СМЕСЕЙ, СПЛАВОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В табл. 9.15—9.20 и на рис. 9.11, 9.12 приведены значения удельной теплоемкости для различных сплавов и технических материалов.

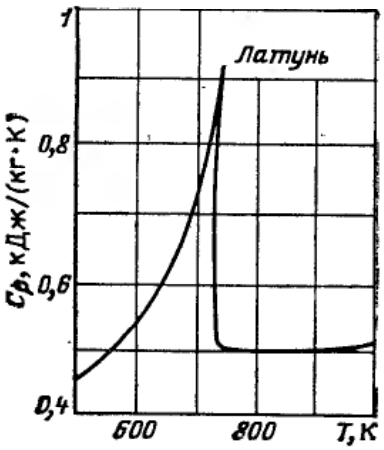


Рис. 9.11. Удельная изобарная теплоемкость β-латуни (массовые доли Cu — 51,8%, Zn — 48,2%) вблизи точки упорядочения [4]

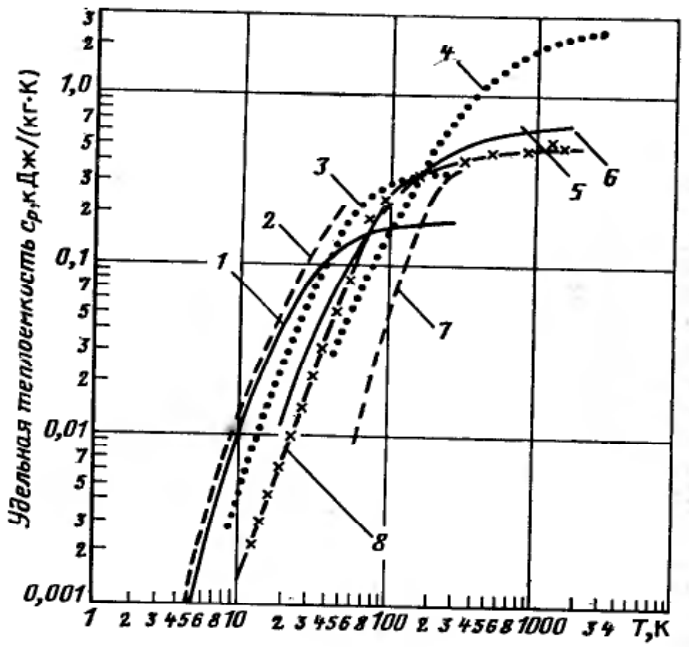


Рис. 9.12. Удельная теплоемкость некоторых сталей, сплавов и графита:

1 — припой (Pb — 50%; Sn — 50%); [5]; *2* — сплав Вуда [5, 33]; *3* — латунь Л-62 [5]; *4* — графит [5, 13, 58]; *5* — СТ-45 [13]; *6* — СТ-Х18Н9Т, СТ-Х18Н10Т; *7* — константан [5, 33]; *8* — монель [5, 33]

Таблица 9.15. **Зависимость удельной изобарной теплоемкости c_p, кДж/(кг · К), воздуха от давления и температуры [56, 57]**

T, К	Давление, МПа				T, К	Давление, МПа			
	0,1	1	10	100		0,1	1	10	100
110	1,028	1,495	2,011	1,683	400	1,014	1,022	1,089	1,244
120	1,020	1,280	2,114	1,704	600	1,052	1,054	1,080	1,176
150	1,011	1,107	2,847	1,575	1000	1,141	1,142	1,150	1,191
200	1,007	1,048	1,641	1,433	1500	1,211	1,212	1,214	1,233
300	1,007	1,021	1,163	1,331	2000	—	—	1,252	1,261

Таблица 9.16. **Удельная теплоемкость c_p, кДж/(кг·К), углеродистых сталей и чугуна при различной температуре T, К**

Марка стали и чугуна	T	c_p	Литература
Ст 08	1173	0,65	[33]
То же	1573	0,66	[33]
Ст 20	300	0,461	[13]
То же	1000	0,673	[13]
Ст 35	300	0,462	[13]
То же	1000	0,564	[13]
Ст У8	300	0,462	[13]
То же	1200	0,662	[13]
Сталь листовая электротехническая	80	0,358	[5]
	150	0,389	[5]
	250	0,426	[5]
Чугун белый	293	0,540	[5]
Чугун СЧ 10	293	0,500	[5]

Таблица 9.17. **Удельная теплоемкость c_p, кДж/(кг·К), легированных сталей при различной температуре T, К**

Марка стали	T	c_p	Литература
15Л, 25Л, 45Л, 55Л	300	0,457	[13]
	800	0,485	[13]
13Н2ХА	300	0,452	[13]
То же	1000	0,612	[13]
Р18	373	0,42	[63]
То же	973	0,69	[63]
11Р3АМ3Ф2	373	0,43	[63]
То же	973	1,01	[63]
Р6М5	373	0,44	[63]
То же	973	0,91	[63]
4Х13	300	0,485	[13]
То же	1000	0,598	[13]
1Х12В2МФ	300	0,485	[13]
То же	1200	0,620	[13]
Х5М	300	0,482	[13]
То же	1400	0,660	[13]
30ХМ, 30ХМА, 30ХГС, 30ХГСА	300	0,461	[13]
	800	0,49	[13]
1Х11МФ, 1Х12ВИМФ	300	0,483	[13]
То же	800	0,955	
25Х2МФА	300	0,481	[13]
То же	800	0,506	
ХН35ВТ (ЭИ612, ЭИ612К)	300	0,495	[13]
То же	1000	0,570	
Х17Н13М2Т (ЭИ448)	300	0,510	[13]
То же	1000	0,650	
Х16Н25М6 (ЭИ395)	300	0,490	[13]
То же	600	0,525	

Продолжение табл. 9.17

Марка стали	T	c_p	Литература
Х22Н26, ВЖ100	300	0,485	[13]
То же	1000	0,535	
ШХ15	300	0,48—0,53	[5]

Таблица 9.18. **Удельная теплоемкость c_p, кДж/(кг · К), двухкомпонентных сплавов, не содержащих железа [33], при различной температуре**

Вещество	T, К	c_p
67% Al, 33% Cu	123	0,42
То же	273	0,60
50% Al, 50% Cu	123	0,35
То же	273	0,51
33% Al, 67% Cu	373	0,46
То же	773	0,53
25% Al, 75% Cu	123	0,31
То же	273	0,43
92% Al, 8% Mg	293	1,15
32% Al, 68%V	288—373	0,66
60% Al, 40% Zn	293—373	0,56
80% Au, 20% Cu	137	0,164
То же	285	0,183
55,5% Bi, 44,5% Pb [13]	403	0,147
	973	0,147
50% Bi, 50% Sn	273—373	0,182
25% Bi, 75% Sn	273—373	0,209
32% Cd, 68% Sn	196—293	0,232
67% Cu, 33% Mg	123	0,30
	673	0,57
33% Cu, 67% Mg	123	0,44
То же	273	0,61
68% Cu, 32% Mg	137	0,35
То же	285	0,41
90% Cu, 10% Ni	137	0,31
То же	285	0,38
10% Ir, 90% Pt	293—373	0,135
78% K, 22% Na (ж) [13]	300	0,971
То же	600	0,879
»	1000	0,888
44% K, 56% Na (ж) [13]	300	1,16
То же	600	1,06
»	1000	1,05
90% Mn, 10% Ni	137	0,39
То же	285	0,46
55% Mn, 45% Ni	137	0,39
То же	285	0,46
36% Pb, 64%Tl	273—298	0,128

Таблица 9.19. **Удельная теплоемкость c_p, кДж/(кг·К), многокомпонентных сплавов при различной температуре T, К**

Вещество	T	c_p	Литература
50% Bi, 31% Pb, 19% Sn	273	0,138	[13]
48% Bi, 26%Pb, 13%Cd	273	0,130	[33]
Алюмель	273	0,52	[33]
Липовица сплав	278—323	0,144	[33]
То же	373—423	0,178	[33]
Нихром	293	0,46	[5]
Розе сплав	196—293	0,147	[33]
То же	293—362	0,23	[33]

Таблица 9.20. **Удельная теплоемкость c_p, кДж/(кг·К), неметаллических технических материалов при различной температуре T, К**

Вещество	T	c_p	Литература
Огнеупоры			
Алундум	373	0,78	[33]
Глинозем	373	0,84	[33]
»	1773	1,15	[33]
Карборунд	273	0,93	[13]
»	1273	1,06	[13]
Кирпич динасовый	273	0,90	[13]
То же	1273	1,16	[13]
Кирпич магнезитовый	273	1,05	[13]
То же	1273	1,32	[13]
Кирпич хромитовый	273	0,90	[13]
То же	1273	1,17	[13]
Кирпич шамотный	273	0,88	[13]
То же	1273	1,14	[13]
Силлиманит	273	0,90	[13]
»	1273	1,16	[13]
Уголь электродный	300—350	0,70	[33]
То же	300—810	0,83	[33]
»	300—1723	1,62	[33]
Фарфор высоковольтный	300	0,75	[13]
Фарфор низковольтный	300	0,85	[13]
Фарфор установочный	300	0,92	[13]
Циркон	273	0,55	[13]
	1273	0,68	[13]
Пластические вещества, полимеры, резина			
Бакелит	300	0,82	[5]
Винипласт	293	1,0	[33]
Капрон	293	2,3	[33]
Найлон-6	100	0,6	[5]
»	200	1,0	[5]
»	300	1,5	[5]
Парафин	253—276	1,6	[33]
Парафин жидкий	333	3,0	[33]
Поликарбонат	100	0,43	[5]
»	300	1,21	[5]
Полиметилакрилат (плексиглас, оргстекло)	100	0,55	[5]
	200	1,05	[5]
То же	300	1,50	[5]
Полистирол яченстый ПС-1	100	0,44	[5]
То же	300	0,34	[5]
Политетрафторэтилен	5	0,006	[5]
(фторопласт-4, тефлон)	20	0,08	[5]
То же	50	0,21	[5]
»	100	0,39	[5]

Продолжение табл. 9.20

Вещество	T	c_p	Литература
Политетрафторэтилен (фторопласт-4, тефлон)	200	0,70	[5]
То же	300	1,16	[5]
Полихлортрифторэтилен	293	0,92	[33]
Полиэтилен	100	0,62	[33]
»	293	2,5	[33]
Полиэфирные пластмассы	293	1—2,3	[33]
Пресс-материал АГ-4С	293	1,17	[5]
Резина	300	1,9	[5]
Эбонит	293	1,43	[33]
Этролы целлюлозные	—	1,6	[33]
Природные вещества, минералы			
Андалузит	273—373	0,70	[33]
Апатит	288—372	0,79	[33]
Асбест	293	1,1	[5]
Аугит	293—371	0,81	[33]
Берилл	323	0,84	[33]
Боракс	308	0,67	[33]
Базальт	273	0,85	[33]
»	1473	1,49	[33]
Гипс	73	0,32	[33]
»	273	1,06	[33]
Гнейс	273	0,74	[33]
»	473	1,02	[33]
Гранит	273	0,65	[33]
»	1073	1,30	[33]
Графит природный	300	0,95—1,05	[5]
Грунт	300	0,85	[13]
Грунт лунный из Моря изобилия	300	0,74	[5]
Доломит	293—372	0,93	[33]
Каолин	273	1,0	[33]
»	673	1,35	[33]
Лава вулканическая	296—373	0,84	[33]
	304—1049	1,09	[33]
Малахит	288—372	0,74	[33]
Слюда	293	0,88	[33]
Тальк	332	0,87	[33]
Шпинель	282—371	0,81	[33]
Шеелит	323	0,4	[33]
Стекла			
Стекло кварцевое	293	0,89	[33]
То же	873	1,00	[33]
»	1473	1,14	[33]
Стекло крон	283—288	0,67	[33]
Стекло натриевое	293—373	0,803	[33]
То же	293—1273	1,125	[33]
Стекло оконное	273—373	0,67	[33]
Стекло пирекс	173—273	0,604	[33]
То же	273—573	0,859	[33]
»	313—1273	1,20	[33]
Стекло термометрическое 16″	292—373	0,832	[33]
Стекло флинт	283—323	0,49	[33]
Стекла из природных силикатов			
Анорит $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	273—373	0,787	[33]
»	273—973	1,007	[33]
Альбит $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	273—373	0,827	[33]
»	273—1173	1,104	[33]

Продолжение табл. 9.20

Вещество	T	c_p	Литература
Волластонит $CaO \cdot SiO_2$	273—373	0,775	[33]
»	273—973	0,985	[33]
Диопсид $CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$	273—373	0,811	[33]
»	273—973	1,020	[33]
Микроклин $K_2O \cdot Al_2O_3 \times 6SiO_2$	273—373	0,803	[33]
»	273—1373	1,087	[33]
Строительные материалы			
Асфальт	298	1,68	[13]
Бетон	298	0,84	[13]
Бумага, картон	298	1,51	[13]
Войлок	298	1,88	[13]
Глина	273	0,75	[33]
»	673	1,13	[33]
»	1073	1,51	[33]
Гранит	298	0,92	[13]
Грунт	298	0,84	[13]
Дерево	298	1,2	[33]
Зола	298	0,75	[13]
Известняк	273—373	0,92	[33]
Камень строительный	298	0,92	[33]
Кирпич красный	298	0,88	[13]
Кирпич силикатный	298	0,84	[13]
Мел	298	0,88	[33]
Мрамор	298	0,92	[13]
Песок речной	298	0,84	[13]
Пробка	273—373	1,8	[33]

Продолжение табл. 9.20

Вещество	T	c_p	Литература
Стекло	298	0,84	[13]
Текстолит	298	1,5	[33]
Торфяная засыпка	298	1,7	[13]
Фанера	273	2,5	[33]
Цементно-песчаный раствор	298	0,84	[13]
Шлак котельный	298	0,75	[13]
Топлива и масла			
Бензин Б-70	293	2,06	[21]
Бензин Б-70	423	2,74	[21]
Бензин Б-70, пары	403	2,28	[21]
То же	523	2,58	[21]
Глицерин	293	2,35	[21]
»	513	3,60	[21]
Керосин Т-1	293	2,00	[21]
То же	423	2,63	[21]
Керосин Т-1, пары	423	2,37	[21]
То же	473	2,47	[21]
Мазут	293	2,18	[13]
Масло ВМ-4	243	1,44	[21]
То же	373	1,62	[21]
Масло МС-20	273	1,98	[21]
То же	423	2,44	[21]
Масло трансформаторное	223	1,70	[21]
То же	373	2,04	[21]
Масла растительные	293	1,5—2,0	[33]
Нефть	293—333	2,10	[33]
Уголь каменный	293—1313	1,31	[33]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Термические** константы веществ: Справочник/Под ред. В. П. Глушко. М.: ВИНИТИ. 1965—1981. Вып. 1—10.

2. **Термодинамические** свойства индивидуальных веществ: Справочное издание/Под ред. В. П. Глушко. — 3-е изд. М.: Наука, 1977—1982. Т. 1—4.

3. **Selected** values of the thermodynamic properties of the elements/R. Hultgren, R. D. Decai, D. T. Hawkins, M. Gleiser, K. K. Kelley, D. D. Wagman. Metals Park (Ohio). Amer. Soc. for Metals. 1973.

4. **Landolt H., Bornstein R.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. Bd 2. T. 4—6 Aufl. Berlin: Springer, 1960.

5. **Кожевников И. Г., Новицкий Л. А.** Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. — 2-е изд. М.: Машиностроение, 1982.

6. **Плотность,** энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость жидкого и газообразного азота при температурах 70—1500 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 4—78. М.: Изд-во стандартов, 1978.

7. **Теплофизические** свойства неона, аргона, криптона и ксенона/В.А. Рабинович, А. А. Вассерман, В. И. Недоступ, Л. С. Векслер. М.: Изд-во стандартов, 1976.

8. **McCarty R. D., Hord J., Roder H. H.** Selected properties of hydrogen. Washington; Govern. print. off. 1983.

9. **Теплофизические** свойства щелочных металлов/ Э. Э. Шпильрайн, К. А. Якимович, Е. Е. Тоцкий и др./ Под ред. В. А. Кириллина. М.: Изд-во стандартов, 1970.

10. **Кислород** жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 70—1000 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 19—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

11. **Медь.** Изобарная теплоемкость в диапазоне температур 4—273,15 К. ГСССД 21—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

12. **Справочник** по физико-техническим основам криогеники/М. П. Малков, И. Б. Даннлов, А. Г. Зельдович, А. Б. Фрадков/Под ред. М. П. Малкова. — 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985.

13. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат, 1978.

14. **Березовский Г. А., Пауков И. Е.**//Журн. физ. хим. 1978. Т. 52. № 10. С. 2677—2679.

15. **Selected** values of the thermodynamic properties of binary alloys/R. Hultgren, R .D. Desai, D. T. Hawkins, M. Gleiser, K. K. Kelley. Metals Park (Ohio)//Amer. Soc. of Metals. 1973.

16. **Angus S., Reuck K. M., McCarty R. D.** International thermodynamic tables of the fluid state — 4. Helium. Oxford: Pergamon Press, 1977.

17. **Cetas T. C., Holste J. C., Swenson C. A.**//Phys. Rev. 1969. Vol. 182. N 3. P. 679—685.

18. **Holste J. C., Cetas T. C., Swenson C. A.**//Rev. Sci. Instrum. 1972. Vol. 43. N 4. P. 670—676.

19. **Leopold H. A., Boorse H. A.**//Phys. Rev. 1964. Vol. 134. N 5A. P. 1322—1328.

20. **Heighbor J. E.**//Ibid. 1967. Vol. 155. N 2. P. 384—387.

21. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд. М.: Наука, 1972.

22. **Стюарт**//Приборы для научных исследований. 1983. № 1. С. 3—15.

23. **Bagatskii M. I., Kucheryany V. A., Manzhelii V. G., Popov V. A.**//Phys. Stat. Sol. 1968. Vol. 26. № 2. P. 453—460.

24. **Radebaugh R., Keesom H.**//Phys. Rev. 1966. Vol. 149. № 1. P. 209—216.

25. **Holste J. C.**//Phys. Rev. B. 1972. Vol. 6. № 6. P. 2495—2497.

26. **Ahlers G.**//Phys. Rev. A. 1970. Vol. 2. № 4. P. 1505—1526.

27. **Mertig M., Pompe G., Hegenbarth E.**//Solid State Comm. 1984. Vol. 49. № 3. P. 369—372.

28. **Кострюкова М. О., Стрелков П. Г.**//Докл. АН СССР. 1965. Т. 162. № 3. С. 543—545.

29. **Ашкрофт Н., Мермин Н.** Физика твердого тела. Т. 1. М.: Мир, 1979.

30. **Leopold H. A., Iafrate G. J., Rothwarf F. e. a.**// J. of Low Temperature Phys. 1977. Vol. 28. № 3/4. P. 241—261.

31. **Hell R. W., Cesier P., Hukin D. A.**//J. Phys. F.: Metal Phys. 1984. Vol. 14. № 5. P. 1265—1276.

32. **Жирифалько Л.** Статистическая физика твердого тела. М.: Мир, 1975.

33. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

34. **Junod A., Staudeman J.-L., Muller J., Spitzli P.**// J. Low Temperature. Phys. 1971. Vol. 5. № 1. P. 25—43.

35. **Гельд П. В., Калишевич Г. И., Суриков В. И.** и др.//Докл. АН СССР. 1974. Т. 215. № 4. С. 833—835.

36. **Vieland L. J., Wicklund A. W.**//Phys. Rev. 1968. Vol. 166, № 2. P. 424—431.

37. **Sandine T. R., Keesom P. H.**//Ibid. 1969. Vol. 177. № 3. P. 1370—1383.

38. **Wiswanathan R.**//J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. № 9. P. 4086—4087.

39. **Knapp G. S., Bader S. D., Fisk Z.**//Phys. Rev. B. 1976. Vol. 13. № 9. P. 3783—3789.

40. **Knapp G. S., Bader S. D., Culbere H. V. e. a.**//Ibid. 1975. Vol. 11. № 11. P. 4331—4338.

41. **Суриков В. И., Калишевич Г. И., Гельд П. В.**// Журн. физ. хим. 1975. Т. 49. № 2. С. 555—556.

42. **Теплофизические свойства аммиака**//И. Ф. Голубев, В. П. Кияшева, И. И. Перельштейн, Е. Б. Парушин и др. М.: Изд-во стандартов, 1978.

43. **Ривкин С. Л., Александров А. А.** Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980.

44. **US NBS** Circular 564. Properties of Gases. Washington: US Gov. Print. Off., 1955.

45. **Angus S., Armstrong B., de Reuk K. M.**//International thermodynamic tables of fluid state — 3. Carbon dioxide. Oxford: Pergamon Press, 1976.

46. **Теплофизические** свойства фреонов. Справочные данные. т. 1. Фреоны метанового ряда/В. В. Алтунин, В. З. Геллер, Е. К. Петров и др. М.: Изд-во стандартов, 1980.

47. **Метан** жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 100—1000 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 18—81. М.: Изд-во стандартов, 1981.

48. **Goodwin R. D., Haynes W. H.** US NBS monograph. 170. Thermophysical properties of propane from 85 to 700 K at pressures to 79 MPa. Washington: US Gov. Print. Off. 1982.

49. **Этан** жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 100—500 К и давлениях 0,1—70 МПА. ГСССД 48—83. М.: Изд-во стандартов, 1983.

50. **Этилен** жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость при температурах 130—450 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 47—83. М.: Изд-во стандартов, 1983.

51. **Пешков В. П.**//Успехи физ. наук. 1968. Т. 94. Вып. 4. С. 607—640.

52. **Физико-механические** и теплофизические свойства металлов/Под ред. Н. Н. Рыкалина. М.: Наука, 1976.

53. **Крафтмахер Я. А., Романишина Т. Ю.**//Физика твердого тела. 1966. Т. 8. № 6. С. 1966—1967.

54. **Новиков И. И., Рощупкин В. В., Мозговой А. Г., Семашко Н. А.**//Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19. № 5. С. 858—962.

55. **Fereira da Silva D., Burgemeister E. A., Dokoupil Z.**//Phys. Lett. 1967. Vol. 25A. № 5. P. 354—356.

56. **Плотность,** энтальпия, энтропия и изобарная теплоемкость жидкого и газообразного воздуха при температурах 70—1500 К и давлениях 0,1—100 МПа. ГСССД 8—79. М.: Изд-во стандартов, 1980.

57. **Таблицы** рекомендованных справочных данных. Воздух. Плотность, сжимаемость, энтальпия, энтропия, изохорная и изобарная теплоемкости, скорость звука и показатель адиабаты при температурах 1300—2000 К и давлениях от 5 до 100 МПа. ГСССД Р. 32—81.

58. **Графит УПВ-1Т.** Энтальпия и теплоемкость в диапазоне температур 1200—2900 К. ГСССД 25—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

59. **Selected** values of chemical thermodynamic properties/F. D. Rossini, D. D. Wagman, W. H. Evans, S. Levine, I. Jaffe. US Gov. Print. Off. 1952.

60. **Selected** values of chemical thermodynamic properties/D. D. Wagman, W. H. Evans, V. B. Parker, J. Hallow, S. M. Baily, R. H. Schumm. Washington: US Gov. Print. Off. 1965—1973.

61. **Бензойная кислота.** Изобарная теплоемкость в диапазоне температур 4—273,15 К. ГСССД 20—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

62. **Стали** 12Х18Н9Т и 12Х18Н10Т. Удельная энтальпия и удельная теплоемкость в диапазоне температур 400—1380 К при атмосферном давлении. ГСССД 32—82. М.: Изд-во стандартов, 1983.

63. **Сталь** инструментальная быстрорежущая. Физические свойства. ГСССД 27—81. М.: Изд-во стандартов, 1982.

ГЛАВА 10

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСШИРЕНИЯ

Э. Б. Гельман

10.1. ВВЕДЕНИЕ

Температурным расширением называется эффект изменения размеров тела с изменением температуры при постоянном давлении. Это явление обусловлено несимметричностью потенциала взаимодействия атомов вещества в решетке, что приводит к ангармонизму колебаний атомов относительно среднего положения.

Температурным коэффициентом объемного расширения β называется относительное изменение объема V при нагревании тела на один кельвин

$$\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P.$$

Для анизотропных веществ температурное расширение характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) α, который определяется как

$$\alpha = \frac{1}{l}\left(\frac{\partial l}{\partial T}\right)_P,$$

где l — размер тела в данном направлении.

В общем случае α — симметричный тензор второго ранга $\alpha=[\alpha_{ij}]$. Если $[\alpha_{ij}]$ привести к главным осям симметрии, то он будет полностью определяться главными значениями ТКЛР α_1, α_2, α_3, так что шар, выделенный в веществе, при нагревании на ΔT преобразуется при $\Delta T \longrightarrow 0$ в эллипсоид с осями, пропорциональными $1+\alpha_1\Delta T$, $1+\alpha_2\Delta T$, $1+\alpha_3\Delta T$, причем $\beta=\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3$. Для кубической сингонии $\alpha_{11}=\alpha_{22}=\alpha_{33}=\alpha$ и тензор вырождается в скаляр. Для гексагональной (тригональной) сингоний $\alpha_{11}=\alpha_{22}=\alpha_\perp$, $\alpha_{33}=\alpha_\parallel$, где индекс $\parallel$ обозначает направление оси шестого (третьего) порядка, а $\perp$ — направление, перпендикулярное этой оси.. Для ромбической сингонии необходимо знать ТКЛР в направлениях осей второго порядка; в кристаллах моноклинной и триклинной сингоний главные оси не определяются однозначно кристаллографической системой координат и зависят от температуры, поэтому температурное расширение таких структур описывают посредством ТКЛР α_a, α_b, α_c в направлении кристаллографических осей координат a, b, c.

Помимо коэффициентов α и β, которые называют истинными, для характеристики температурного расширения используют средние температурные коэффициенты расширения, определяемые как средние значения истинных коэффициентов на конечном интервале температуры ΔT:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{l}\left(\frac{\Delta l}{\Delta T}\right)_P; \quad \bar{\beta} = \frac{1}{V}\left(\frac{\Delta V}{\Delta T}\right)_P,$$

а также (для анизотропных веществ) средний по направлению ТКЛР $\alpha_{ср} = \frac{1}{3}\beta = \frac{1}{3}(\alpha_{11}+\alpha_{22}+\alpha_{33})$. Единица измерения всех температурных коэффициентов расширения K^{-1}.

Существует приближенная феноменологическая связь между теплоемкостью C_V вещества при постоянном объеме и его изотермической сжимаемостью k_T, описываемая законом Грюнейзена:

$$\beta = \gamma \frac{C_V}{V} k_T, \quad k_T = -\frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T,$$

где P — давление; γ — так называемая постоянная Грюнейзена, а также различные эмпирические соотношения, например

$$\alpha T_{пл}^{1,17} = A,$$

где $T_{пл}$ — температура плавления вещества; $A=7{,}24\cdot10^{-2}$ для веществ с металлическим характером связей, $A=11{,}5\cdot10^{-2}$ для щелочно-галоидных соединений.

В общем случае α и β зависят от давления, температуры, химического состава, структуры тела и его фазового состояния. Монотонный характер зависимости $\alpha(T)$ нарушается в точках фазового перехода, а также за счет сложения электронного, магнитного и решеточного вкладов в температурное расширение, которые в определенных температурных интервалах могут быть различными по знаку и сравнимыми по значению.

В табл. 10.1—10.12 приведены значения ТКЛР для индивидуальных веществ (элементов и неорганических соединений), а также для технических материалов в твердом состоянии. В табл. 10.13 приведены значения температурного коэффициента объемного расширения некоторых жидкостей и газов.

10.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Таблица 10.1. Истинный температурный коэффициент линейного расширения элементов в кристаллическом состоянии α, 10^{-6} K^{-1} [1]

Элемент	Температура, K													Дополнительная литература
	5	10	30	50	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	
Ac	—	—	—	—	—	—	14,9 (оценка)		—	—	—	—	—	—
Ag	0,0177	0,111	3,36	7,94	14,7	17,8	18,9	19,5	20,2	21,0	23,1	25,6	28,1	—
Al	—	0,051	1,04	3,62	12,3	20.2	23,3	24,5	26,2	28,1	32,6	37,8 (900 K)		[2, 3]
Am ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	—	—	7,1	—	9	—	—	—	—	—
Ar ($\alpha_{ср}$)	5,1	46,2	287	457	667 (80 K)		—	—	—	—	—	—	—	—
As ($\alpha_{\parallel}$)	0,073	0,514	10,7	18,7	31,25 (85 K)		43,44 (283 K)			—	—	—	—	[2]
($\alpha_{\perp}$)	—	—	—	—	—	—	3,0 (279 K)		—	—	—	—	—	[2]
Au	0,026	0,228	4,22	7,65	11,5	13,3	14,0	14,5	15,0	15,5	16,5	17,7	19,1	—
B	—	—	—	—	—	—	8 (273 K)		—	8,3 (658 K)		—	—	[2]
Ba	0,200	1,73	10,55	13,7	17,10 (85 K)		16,4	20,5	24,6	—	—	—	—	[2]
Be ($\alpha_{\parallel}$)	—	—	—	—	0,66	5,25	9,20	11,5	12,9	14,0	15,9	17,6	19,5	—
($\alpha_{\perp}$)	—	—	—	—	1,48	7,89	12,4	14,9	16,9	18,3	20,2	21,4	23,4	—
Bi ($\alpha_{\parallel}$)	0,26	2,07	13,1	16,0	16,85	17,1	17,2	17,4	17,5	—	—	—	—	—
($\alpha_{\perp}$)	0,026	0,20	3,20	6,84	9,96	11,2	11,7	11,8	11,9	—	—	—	—	—
Br (α_a)	—	—	—	—	—	133,1	—	—	—	—	—	—	—	—
(α_b)	—	—	—	—	—	86,44	—	—	—	—	—	—	—	—
(α_c)	—	—	—	—	—	29,55	—	—	—	—	—	—	—	—
C (алмаз)	—	$4 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-4}$	0,004	0,05	0,45	1,0	1,80	2,53	3,09	3,83	4,32	4,83	[3]
(графит) ($\alpha_{\parallel}$)	—	—	3,8	8,7	17,6	24,9	26,7	27,5	28,1	28,5	28,9	29,2 (950 K)		[4]
($\alpha_{\perp}$)	—	—	—0,09	—0,50	—1,07	—1,33	—1,22	—0,91	—0,53	—0,18	0,39	0,66 (950 K)		[4]
Ca	0,010	0,094	3,3	9,6	16,8	20,4	22,4	24,1	25,8	27,6	33,6	—	—	[2]
Cd ($\alpha_{\parallel}$)	0,28	7,2	50,0	58,9	59,7	56,5	54,0	50,5	43,4	—	—	—	—	—
($\alpha_{\perp}$)	—0,01	—1,05	—2,95	2,6	10,6	16,7	19,6	25,8	37,0	—	—	—	—	—
Ce ($\alpha_{ср}$)	—4,0	—8,6	5,0 (15 K)		—	—	—	6,2	6,2	6,2	7,6	9,1 (950 K)		—
Cl ($\alpha_{ср}$)	—	—	100 (39 K)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Co ($\alpha_{ср}$)	0,014	0,035	0,45	1,93	6,9	11,7	12,2	13,3	14,3	15,1	14,2	15,4 (1100 K)		[5]
Cr ($\alpha_{ср}$)	—0,14	—0,29	—0,38	0,15	2,25	5,18	5,00	8,3	8,7	9,1	9,9	10,7	11,8	[3]
Cs	—	—	—	—	—	—	97,0	97,0 (370 K)		—	—	—	—	—
Cu	0,009	0,021	1,00	3,87	10,5	15,2	16,7	17,3	17,9	18,6	20,1	21,8	23,8	[2, 58, 61]
Dy ($\alpha_{ср}$)	(α_a=33, α_b=24, α_c=4,7 ... 50 K)				3,0	7,3	7,9	9,5	10,5	11,1	12,2	—	—	—
($\alpha_{\parallel}$)	—	—	—	—	—	—	—	16,6 ($\alpha_{\perp}$ = 6,0)			—	—	—	—
Er ($\alpha_{ср}$)	—	1,5	5,0	—	7,1	9,0	9,5	9,9	10,3	10,7	11,8	15,2	17,8 (110 K)	[6]

Продолжение табл. 10.1

Элемент	Температура, К													Дополнительная литература
	5	10	30	50	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	
Er ($\alpha_{\parallel}$)	—	—	—	—	—	—	19,3	($\alpha_{\perp}$ = 6,6)		—	—	—		[6]
Eu ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	—	—	34,2	25,7	20,2	19,4	—	—	—	—
Fe	0,017	0,040	0,22	1,00	5,09	9,96	12,0	13,2	14,4	15,5	16,5	14,7	22,5	—
Fr	—	—	—	—	—	—	102 (оценка)			—	—	—	—	—
Ga ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	15,7	18,8	20,7	—	—	—	—	—	—	[3]
(α_a)	—	—	—	—	—	—	16,2	(α_b = 11,1,	α_c = 30,2)			—	—	[7]
Gd ($\alpha_{ср}$)	—2	—3	—	—	5	6	6,3	6,6	7,8	8,3	9,2	11,2	17,6	—
Ge	0,0011	0,0045	—0,071	0,12	2,29	4,93	5,82	6,28	6,71	7,12	7,83	8,73 (1100 K)		[2]
H_2	—	4800 (в тройной точке, 13,96 K)						—	—	—	—	—	—	—
Hf ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	—	—	6,0	6,7	6,9	7,11	7,54	7,98	8,4	[2]
Hg ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	36,9	47,6	—	—	—	—	—	—	—	—
($\alpha_{\parallel}$)	—	—	—	—	42,9	($\alpha_{\perp}$ = 34,0)		—	—	—	—	—	—	—
Ho ($\alpha_{\parallel}$)	—	—	—100 (60 K)		—70	9	13	15,8	16,8	17,8	19,9	22,2 (950 K)		—
($\alpha_{\perp}$)	—	—	—	—	32	—	5	—	5,0	5,0	5,4	7,0 (950 K)		—
I ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	53	70	83	88	—	—	—	—	—	—	—
(α_a)	—	—	—	—	—	—	133,4	(α_b = 95,	α_c = 35,1)			—	—	—
In ($\alpha_{\parallel}$)	—1,26	4,01	23,0	23,0	18,0	5,9	—16,2	—42,0	—	—	—	—	—	—
($\alpha_{\perp}$)	0,99	0,94	7,2	17,0	28,0	37,9	53,9	79,5	—	—	—	—	—	—
Ir	—	—	0,93	2,0	4,11	6,09	6,40	6,51	6,73	7,02	7,66	8,72 (1100 K)		
K	0,95	6,01	35,5	49,1	59,5	68,3	79,6	—	—	—	—	—	—	[8]
Kr ($\alpha_{ср}$)	8,1	57	216	280	430	—	—	—	—	—	—	—	—	—
La ($\alpha_{ср}$)	0,16	—	—	—	3,3	4,4	5,0	5,7	6,8	—	10,3	12,1	—	—
Li	—	—	—	—	22,5	39,0	47,1	—	—	—	—	—	—	—
Lu ($\alpha_{\parallel}$)	1,3	2,5	7,4	11,5	17,5	18,1	20,0	19,1	17	—	—	18	—	—
($\alpha_{\perp}$)	0,3	0,6	2,0	3,5	7,3	6,2	5,8	5	7	9	12	12	—	—
Mg ($\alpha_{\parallel}$)	0,0075	0,03	1,35	5,91	16,1	23,8	—	—	—	—	—	—	—	—
($\alpha_{\perp}$)	0,011	0,05	1,35	5,34	15,0	22,3	—	—	—	—	—	—	—	—
($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	—	—	25,8	27,3	29,0	31,0	35,0	—	—	—
α-Mn	—0,14	—0,28	—0,9	—0,7	11,9	19,0	22,8	25,8	28,4	30,9	35,9	—	—	[3]
β-Mn	—	—	—	—	14,8	21,6	25,6	—	—	—	—	43,2	48,2	[3]
γ-Mn	0,049	0,130	1,40	4,01	8,10	12,3	15,1	—	—	—	—	45,2 (1400 K)		[3]
Mo	0,007	0,02	0,17	0,74	2,68	4.57	5,27	5,45	5,63	5,82	6,20	11,43 (2400 K)		[3, 60]
N_2	12,5	30	550	692,0 (44 K)		—	—	—	—	—	—	—	—	—
Na	—	—	—	—	45,7	64,7	71,5	—	—	—	—	—	—	—
Nb	0,003*	0,04	0,64	2,14	4,84	6,39	7,10	7,30	7,50	7,70	8,09	10,39 (2400 K)		—

* В сверхпроводящей фазе при 6 К.

Продолжение табл. 10.1

Элемент	Температура, К													Дополнительная литература
	5	10	30	50	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	
Nd ($\alpha_{ср}$)	—2,0	2,9	—	—	7,9	7,0	7,0	7,0	7,2	7,6	8,9	13,4 (1100 К)		—
Ne ($\alpha_{ср}$)	46	337	1723 (23 К)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ni	0,02	0,05	0,26	1,64	6,61	11,4	13,0	13,7	14,9	16,9	16,7	18,2	20,3	[3]
Np ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	—	—	27,66	—	—	42,7 (700 К)		—	—	—
O_2 ($\alpha_{ср}$)	200 (21 К)		535	870 (48 К)		—	—	—	—	—	—	—	—	—
Os ($\alpha_{\parallel}$)	—	—	—	—	—	—	5,84	6,17	6,55	7,01	8,18	—	—	—
($\alpha_{\perp}$)	—	—	—	—	—	—	3,97	4,16	4,42	4,76	5,65	—	—	—
P (белый)	—	—	—	—	—	—	124,5	—	—	—	—	—	—	—
(красный)	—	—	—	—	—	—	66,5 (оценка)			—	—	—	—	—
Pa ($\alpha_{\parallel}$)	—	—	—	—	—	—	—	4,4 ($\alpha_{\perp}$ = 21,4)			—	—21,7 ($\alpha_{\perp}$ =85)		—
Pb	0,11 (4 К)	3,02	17,0	21,8	25,4	27,3	28,5	29,63	31,73	33,3 (550 К)	—	—	—	—
Pd	0,5 (20 К)		1,12	3,57	7,95	10,84	11,75	12,48	13,20	13,90	15,3	17,40 (1100 К)		—
Pm	—	—	—	—	—	—	9,0 (оценка)		—	—	—	—	—	—
Po ($\bar{\alpha}$)	—	—	—	—	—	23 (179÷300 К)			—	—	—	—	—	—
Pr	—	—	—	—	6,5	5,6	5,0	5,0	5,2	5,7	7,3	7,8 (850 К)		—
Pt	0,0155	0,071	1,43	3,80	6,77	8,55	8,99	9,24	9,46	9,70	10,2	15,6 (2100 К)		[2, 61]
Pu ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	—	39,5	48,7	41,3 (440 К)		8,61 (650 К)		—16,3 (750 К)		—
Ra ($\bar{\alpha}$)	—	—	—	—	—	—	—	17,1	(300 — 600 К)		—	—	—	[5]
Rb	—	—	—	—	—	—	90	—	—	—	—	—	—	—
Re ($\alpha_{ср}$)	0,0053	0,0158	0,31	1,81	4,10	4,50	4,70	3,95		3,83	3,58	3,33	3,13	[9]
($\bar{\alpha}_{\parallel}$)	—	—	—	—	—	—	6,25	($\bar{\alpha}_{\perp}$ = 7,0	293 — 1200 К)			—	—	[62]
Rh	—	—	0,40	1,70	4,99	7,57	8,50	8,93	9,38	9,84	10,80	12,40 (1100 К)		[3]
Ru ($\alpha_{\parallel}$)	—	—	—	—	—	7,0	8,70	9,09	9,49	9,92	10,83	11,81	12,87	—
($\alpha_{\perp}$)	—	—	—	—	—	4,8	5,8	5,94	6,16	6,45	7,15	7,95	8,80	—
S (ромб.)	—	—	—	—	42	57	64,1	—	—	—	—	—	—	[2]
(моноклин.)	—	—	—	—	—	—	80	—	—	—	—	—	—	[2]
Sb ($\alpha_{\parallel}$)	—	0,04	5,19	13,17	15,8	16,15	16,2	—	—	—	—	—	—	[4]
($\alpha_{\perp}$)	—	—0,01	0,47	2,31	5,99	7,72	8,31	—	—	—	—	—	—	[4]
($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	—	—	—	11,4	11,7	11,8	11,8			[4]
Sc ($\alpha_{\parallel}$)	—	—	—	—	15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1	15,4	16,1	17,3	[11]
($\alpha_{\perp}$)	—	—	—	—	7,2	7,4	7,61	8,07	8,53	8,99	9,93	11,9	10,9	[11]
Se (моноклин.)	—	—1,75	—16,1	—19,9	—13,8	—13,3	—13,4	—	—	—	—	—	—	[12]
($\alpha_{\parallel}$)														

Продолжение табл. 10.1

Элемент	Температура, К													Дополнительная литература
	5	10	30	50	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	
Se($\alpha_\perp$)	—	2,4	29,7	42,0	53,5	62,4	69,8	—	—	—	—	—	—	[12]
(стекл.)	—	3,7	21,6	28,1	31,1	38,4	53,9	—	—	—	—	—	—	[12]
(гекс.) ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	20,2 (140 K)		22,5	26,4	40,5	45,2 (478 K)		—	—	—	[13]
Si	0,0001	0,0009	—0,052	—0.24	—0.34	1,43	2,54	3,05	3,39	3,68	4,19	4,65	—	[14]
Sm ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	—	—	10,4	—	—	—	—	—	—	—
α-Sn	—	—	—0,82	0,38	3,48	5,21 (220 K)		—	—	—	—	—	—	—
β-Sn ($\alpha_\parallel$)	0,18	1,65	13,7	18,5	23,2	26,5	31,4	37,2	41,4	—	—	—	—	—
($\alpha_\perp$)	—0,025	—0,1	1,2	4,9	11,8	14,8	16.0	18,6	20,3	—	—	—	—	—
Sr	—0,037	0,27	8,2	13,7	19,4	—	22,45 (283 K)		—	22,2	20,0 (850 K)		—	[2]
Ta	0,009	0,048	0,92	2,40	5,02	6,25	6,6	6,72	6,84	6,95	7,12	7,32	7,53	—
Tb ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	—	—	7,0	8,6	9,5	10;0	11,1	16 (1100 K)		[15]
Tc ($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	—	—	8,1	—	—	—	—	—	—	—
Te ($\alpha_\parallel$)	—0,274	—1,81	—9,5	—8,1	—4,2	—2,3	—2,0	—2,69 (450 K)		—	—	—	—	—
($\alpha_\perp$)	0,34	2,48	17,2	23,3	25,9	28,0	29,3	31,9 (450 K)		—	—	—	—	—
Th	—	—	7,3 (70 K)		9	10,3	11,2	12,3	13,1	13,7	14,8	—	—	—
Ti	—	0,03	0,5	1,76	4,59	7,23	8,3	8,82	9,34	9,86	10,96	12,08	11,95	—
Tl ($\alpha_\parallel$)	5,3 (7 K)	—	20,6	24,6	29,3	33,9	—	—	—	—	—	—	—	—
($\alpha_\perp$)	1,3 (7 K)	—	14,2	21,5	23,2	25,0	—	—	—	—	—	—	—	—
($\alpha_{ср}$)	—	—	—	—	—	—	29,6	30,3	41,5 (530 K)		—	—	—	—

Продолжение табл. 10.1

Элемент	Температура, К													Дополнительная литература
	5	10	30	50	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	
Tm ($\alpha_{\parallel}$)	—	—	—	—	—	—	—	20	20	20	20	22 (1050 K)		—
($\alpha_{\perp}$)	—	—	—	—	—	—	—	12	12	12	12	14 (1050 K)		—
($\alpha_{ср}$)	—	—0,7	2,2	—1,3 (56 K)	3,0	5,0	5,8	—	—	—	—	—	—	—
U (α_a)	—	—136 (36 K)		23,9 (90 K)		25,7	26	26,2	30,2	35,1	46,6	54,7 (900 K)		—
(α_b)	—	—28,2 (36 K)		2,9 (90 K)		1,6	0,4	—0,8	—2,5	—5,6	—17,2	—25 (900 K)		—
(α_c)	—	52,1 (36 K)		10,9 (90 K)		15,0	18,0	21,6	25,8	30,7	41,6	47,2 (900 K)		—
V	0,025 (6 K)	0,045	0,35	1,13	3,95	7,49	7,84	8,5	9,3	9,8	10,7	11,7	12,7	—
W	0,00044	0,007	0,2	0,8	2,3	4,1	4,6	4,6	4,6	4,7	4,8	4,9	5,1	[3]
	—	—	—	—	—	—	—		6.5 (2000 K)			8,8 (3200 K)		[3]
Xe	8,7	40	140,3	183,0	263,0	420,7 (155 K)	—	—	—	—	—	—	—	—
Yb	0,17	1,23	—	—	—	—	—	25,7	27,0	29,1	33,1	33,7 (850 K)		—
Yt ($\alpha_{\parallel}$)	—	0,1	2,1	6.2	13,7	18,4	19,2	19,4	19,6	19,7	20,1	22,3 (1050 K)		—
($\alpha_{\perp}$)	—	—	0,3	0,8	2,9	4,3	4,6	5,0	5,4	5,6	6,7	10,1 (1050 K)		—
Zn ($\alpha_{\parallel}$)	0,05	0,76	33,4	54,1	65,4	65,6	63,5	61.0	58,9	50,3 (650 K)		—	—	—
($\alpha_{\perp}$)	—0,001	—0,06	—4,3	—3,0	4,1	10,4	13,2	15,7	17,7	27,9 (650 K)		—	—	—
Zr ($\alpha_{\parallel}$)	—	—	—	—	—	6,55	7,36	8,20	9,07	9,97	11,84	14,87 (1100 K)		—
($\alpha_{\perp}$)	—	—	—	—	—	4,87	4,99	5,09	5,16	5,20	5,19	4,94 (1100 K)		—
($\alpha_{ср}$)	—	0,02	0,75	1,90	4,09	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 10.2. **Температурный коэффициент линейного расширения индивидуальных соединений. Приведены значения истинного ТКЛР α (при данной температуре) или среднего ТКЛР $\bar{\alpha}$ (в интервале ΔT)**

Вещество	T, ΔT, К	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} K^{-1}	Литература
AgBr	300	34,3	[16]
AgCl	300	30,1	[13]
	473	34,54	[13]
	698	69,99	[13]
$AgGaSe_2$	300	7,1	[33]
α-, β-AgI	100	—0,3	[1]
	200	—0,9	[1]
	300	—1,5	[1]
	400	—3,2	[1]
	600	36,83	[1]
	750	44,6	[1]
γ-AgI	120—300	—1,6	[1]
$AgInSe_2$	300	1,9	[33]
$AgInTe_2$	300	4,3	[33]
AlAs	300	3,5	[1]
	400	4,1	[1]
	288—1113	5,2	[1]
AlN	300—873	4,8	[22]
Al_2O_3 ($\alpha_{\parallel}$)	300	6,7	[31]
	400	6,46	[31]
	600	7,38	[31]
	800	7,99	[31]
Al_2O_3 ($\alpha_{\perp}$)	300	5,0	[31]
	400	5,82	[31]
	600	6,68	[31]
	800	7,23	[31]
AlSb	30	—0,90	[1]
	50	—0,94	[1]
	100	0,49	[1]
	200	3,36	[1]
	300	4,08	[1]
	300—1323	4,88	[1]
As_2O_3	300—1273	8,4	[16]
As_2S_3	300—438	24,62	[13]
B_4C	300—1073	4,5	[34]
BN	300	7,5	[29]
BP	400	4,0	[35]
	600	5,0	[35]
	800	6,2	[35]
BaB_6	300—1073	6,8	[16]
BaF_2	30	0,7	[1,3]
	50	2,9	[1,3]
	100	9,9	[1,3]
	200	16,1	[1,3]
	300	18,4	[1,3]
$Ba(NO_3)_2$	3—77	3,3	[16]
	77—200	6,7	[16]
	300	15,2	[16]
$BaNaNb_5O_{15}$	300	10,9	[36]
$BaSi_2$	300—1373	8,4	[16]
$BaSrNb_2O_6$ (α_a)	300	10	[36]
(α_c)	200—900	9	[36]
$BaTiO_3$ (ромбоэдр.)	113—174	8,8	[17]
(куб.)	200	6,5	[18]
	300	7,5	[17]
	400	8,6	[18]
	773	12,3	[17]
$BaTiO_3$ (тетр.)	300	11,4	[18]
	293—393	3,5	[17]
(орторомб.)	174—277	11,4	[18]
Be_2C	300	5,6	[16]
	300—473	7,7	[16]
	300—673	9,5	[16]
BeO	300—373	5,42	[34]
	300—673	7,08	[34]
Bi_2Te_3 ($\alpha_{\parallel}$)	50	13	[19]
	100	18	[19]
	200	20	[19]
	300	21,3	[19]
	400	22,6	[19]
	600	24	[19]
($\alpha_{\perp}$)	30	5	[19]
	50	8	[19]
	100	11	[19]
	200	12	[19]
	300	12,9	[19]
	400	15	[19]
	600	17	[19]
CBr_4	200	1,03	[3]
	300	1,50	[3]
$(CH_2NH_2COOH_3)BeF_4$ (триглицинфторобериллат)			
(α_{100})	100	15	[3]
	200	0	[3]
	300	20	[3]
(α_{010})	100	48	[3]
	200	64	[3]
	300	50	[3]
(α_{001})	100	10	[3]
	200	16	[3]
	300	10	[3]
$(CH_2NH_2COOH_3)H_2SO_4$ (триглицинсульфат)	100	5	[3]
(α_{100})			
	200	3	[3]
	300	—30	[3]
(α_{010})	100	40	[3]
	200	41	[3]
	300	—10,5	[3]
(α_{001})	100	10	[3]
	200	16	[3]
	300	8,5	[3]
$(CH_2NH_2COOH_3)H_2SeO_4$ (триглицинселенат)	100	5	[3]
(α_{100})			
	200	0	[3]
	300	—30	[3]
(α_{010})	100	12	[3]
	200	35	[3]
	300	—30	[3]
(α_{001})	100	10	[3]
	200	16	[3]
	300	95	[3]
CaB_6	300	6,5	[38]
$CaCO_3$ ($\alpha_{\parallel}$)	200	22,4	[3]
	300	24,4	[13]
	323	26,6	[3]
($\alpha_{\perp}$)	200	5,41	[13]
	300	5,68	[3]
	323	5,2	[13]
	638	—3,8	[3]
$CaCl_2$	300—463	22,3	[16]

Вещество	T, ΔT, K	$\bar{\alpha}$, 10^{-6} K^{-1}	Литература
CaF_2	30	0,3	[1,3]
	50	1,6	[1,3]
	100	7,52	[1,3]
	200	15,6	[1,3]
	300	18,80	[1,3]
	320	19,09	[1,3]
$CaMoO_4$ (α_a)	300	19,4	[20]
(α_c)	300	25,5	[29]
CaO	300—573	10,2	[31]
	300—673	13,2	[37]
$Ca_3(PO_4)_3$	300	9	[20]
$CaTiO_3$	300	10	[24]
$Ca_3(VO_4)_2$ (α_a)	300	5,5	[20]
(α_c)	300	3,5	[20]
$CaWO_4$ (α_a)	80—300	7,9	[17]
	300	11,2	[20]
	400	11,2	[17]
	773—1073	13,8	[20]
(α_c)	80—300	12,7	[17]
	300	18,7	[20]
	400	18,7	[17]
	773—1073	22,0	[20]
Cd_3As_2	300	11,4	[3]
CdB_6	300—1173	8,7	[16]
CdF_2	300	27,0	[13]
$CdGeAs_2$	300	11,4	[3]
$CdGeP_2$	300	3,2	[3]
(стекл.)	300	5,2	[3]
CdI_2	323	29,1	[16]
Cd_2O_3	300—373	10,5	[37]
	300—1073	10,0	[37]
Cd_3P_2	300	9,63	[3]
CdS ($\alpha_{ср}$)	50	—2,4	[1, 13]
($\alpha_{\parallel}$)	77—298	2,1	[1]
	300	4,1	[13]
	600	4,2	[1]
	800	4,8	[13]
($\alpha_{\perp}$)	77—298	4,0	[1, 13]
	300	6,5	[1]
	600	6,6	[13]
	800	7,3	[1]
$CdSe$ ($\alpha_{\parallel}$)	77—298	2,45	[1, 13]
($\alpha_{\perp}$)	77—298	4,4	[1, 13]
$CdSnAs_2$	300	4,7	[25]
$CdTe$	30	—2,75	[1]
	50	—1,80	[13]
	100	1,38	[1]
	200	4,09	[13]
	300	4,96	[1]
	400	5,10	[13]
	600	5,45	[1]
	800	5,8	[13]
$CdTl_2Te_4$	200	1,66	[3]
	300	2,35	[3]
CeB_6	300—1073	7,3	[16]
CeO_2	300	8,5	[25]
	373—773	8,6	[25]
Ce_2S_3 ($\alpha_{\parallel}$)	300	13,2	[25]
($\alpha_{\perp}$)	300	10,5	[25]
Ce_2Se_3 ($\alpha_{ср}$)	300	12,6	[25]

Вещество	T, ΔT, K	$\bar{\alpha}$, 10^{-6} K^{-1}	Литература
CmO_2	300	8,1	[31]
	400	8,1	[31]
	600	8,1	[31]
Cm_2O_3	773—1073	6,6	[31]
CoF_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300	3,6	[28]
($\alpha_{\perp}$)	300	10,7	[28]
CoO	300	14,0	[31]
$CoSb$	100	8,3	[3]
	200	11,4	[3]
	300	12,5	[3]
$CoSi$	300—1073	10,6	[16]
Cr_3C_2	300—373	8,8	[27]
	300—873	8,0	[34]
CrN	300—1073	2,3	[34]
CrO_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300	—10,3	[31]
($\alpha_{\perp}$)	300	16,2	[31]
CrS	300—1300	12.3	[34]
Cr_2S_3	300	12,3	[25]
$CsBr$	30	20,0	[3]
	50	28,7	[13]
	100	38,6	[3]
	200	43,1	[13]
	300	46,6	[3]
	400	52,24	[13]
	600	61	[3, 13]
$CsCl$	300	44,8	[16]
CsI	300	48,6	[17]
Cu_3AsS_4	300	3,2	[25]
Cu_3AsSe_4	300	9,5	[25]
CuB_6	300—1073	6,5	[16]
$CuBr$	293—423	19	[13]
$CuCl$	293—413	10	[13]
$CuGaSe_2$	300	5,4	[25]
$CuGaTe_2$	300	6,9	[33]
$CuGeS_3$	300	7,8	[25]
$CuGeSe_3$	300	8,4	[25]
CuI	300—875	25,2	[1]
$CuInSe_2$	300	6,6	[25]
$CuInTe_2$	300	7,1	[25]
Cu_3SbSe_4	300	7,1	[25]
Cu_2SnSe_3	300	8,9	[25]
Cu_2SnS_3	300	7,8	[25]
$DyBi$	300	10,2	[3]
Dy_2O_3	300—1113	8,3	[34]
$ErBi$	300	10,8	[3]
Er_2O_3	373—573	5,7	[31]
Eu_2O_3	300—373	10,4	[31]
EuB_6	300	6,9	[38]
EuS	300	14,6	[25]
$EuSe$	300	18,6	[25]
FeF_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300	—0,4	[28]
($\alpha_{\perp}$)	300	16,8	[28]
Fe_4N	300	7,9	[16]
FeS	293—1273	22,1	[34]
FeS_2	320	8,9	[16]
Fe_3Se_4	30	—0,30	[3]
	50	—2,15	[3]
	100	—3,80	[3]
	200	—0,90	[3]
	300	1,85	[3]

Вещество	T, ΔT, K	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} K^{-1}	Литература
Fe_3Si	293—1273	14,4	[34]
Fe_5Si_3	70	0,5	[3]
	100	4,3	[3]
	200	8,3	[3]
	300	8,2	[3]
$FeTe_2$ (α_a)	300	21	[1]
	400	24	[1]
	600	38	[1]
	800	61	[1]
$FeTe_2$ (α_b)	300	46	[1]
	400	48	[1]
$FeTe_2$ (α_b)	600	58	[1]
	800	80	[1]
(α_c)	300	3	[1]
	400	7	[1]
	600	15	[1]
	800	22	[1]
GaAs	10	0,0045	[1]
	30	—0,177	[1]
	50	—0,15	[1]
	100	2,05	[1]
	200	4,93	[1]
	300	5,82	[1]
	400	6,23	[1]
	600	6,98	[1]
	800	7,4	[1]
GaP	300	5,6	[1]
	400	5,7	[1]
	800	6,1	[1]
GaSb	10	—0,026	[1]
	30	—0,34	[1]
	50	0,0	[1]
	100	2,81	[1]
	200	5,81	[1]
	300	6,36	[1]
	400	6,40	[1]
	600	6,40	[1]
Ga_2Se_3	30	1,70	[1]
	50	3,02	[1]
	100	5,83	[1]
	200	8,14	[1]
	300	8,99	[1]
	400	9,30	[1]
Ga_2Te_3	77	9,2	[1]
	300	8,3	[1]
GdB_6	300—1060	11,86	[1]
GdBi	300	8,7	[38]
Gd_2O_3	300	9,2	[3]
GeO_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300—1073	10,0	[31]
($\alpha_{\perp}$)	300	2,0	[28]
H_2O	300	6,0	[28]
	23	—6,1	[16]
	83	3,3	[16]
	193	39,2	[16]
	273	52,7	[16]
HfB_2	300—1273	6,3	[31]
HfC	300—473	6,0	[27]
	300—873	6,5	[27]
HfN	300—1373	6,9	[34]
HfO_2	530—1120	6,84	[34]
HgBr (α_{100})	100	53,4	[3]
	200	42,8	[3]
	300	45,0	[3]
HgBr (α_{010})	100	45,5	[3]
	200	42,8	[3]
	300	45,0	[3]
HgBr (α_{001})	100	4,8	[3]
	200	3,2	[3]
	300	3,7	[3]
HgCl (α_{100}, α_{010})	100	44,1	[3]
	200	43,0	[3]
	300	47,0	[3]
(α_{001})	100	1,6	[3]
	200	0,3	[3]
	300	1,4	[3]
HgSe	300	1,48	[1]
	400	1,64	[1]
	500	1,66	[1]
HgTe	300	4,80	[1]
	400	4,80	[1]
HoBi	300	10,5	[1]
Ho_2O_3	300—1073	8,44	[37]
InAs	10	—0,058	[1]
	30	—0,86	[1]
	50	—0,4	[1]
	100	2,05	[1]
	200	3,80	[1]
	300	4,41	[1]
	400	5,07	[1]
	600	5,67	[1]
	800	5,92	[1]
In_2O_3	300—1273	7,2	[31]
InP	300	4,3	[1]
	400	4,5	[1]
	600	4,9	[1]
	800	5,9	[1]
InS ($\alpha_{\parallel}$)	150	7,05	[3]
	200	8,76	[3]
	300	10,8	[3]
InS ($\alpha_{\perp}$)	150	9,48	[3]
	200	11,5	[3]
	300	14,2	[3]
InSb	10	—0,24	[1]
	30	—1,5	[21]
	50	—0,4	[1]
	100	2,60	[21]
	200	4,67	[1]
	300	5,15	[21]
	400	5,3	[1]
	473	5,4	[21]
InSe ($\alpha_{\parallel}$)	150	8,94	[3]
	200	10,8	[3]
	300	12,4	[3]
($\alpha_{\perp}$)	150	11,25	[3]
	200	13,7	[3]
	300	16,0	[3]
InTe ($\alpha_{\parallel}$)	150	8,82	[3]
	200	11,25	[3]
	300	14,0	[3]
($\alpha_{\perp}$)	150	10,75	[3]
	200	13,55	[3]
	300	16,42	[3]
In_2Te_3	30	2,97	[1]
	50	5,32	[1]

Вещество	T, ΔT, К	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} K^{-1}	Литература
In_2Te_3	100	8,03	[1]
	200	9,94	[1]
	300	10,10	[1]
IrO_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300	1,7	[28]
($\alpha_{\perp}$)	300	3,8	[28]
KBr	30	6,83	[3]
	50	16,7	[13]
	100	29,3	[3]
	200	34,6	[13]
	320—953	38	[13]
KCl	30	3,11	[3]
	50	11,4	[22]
	100	25,4	[3]
	200	33,5	[22]
	300	37,0	[3]
	400	38,8	[22]
	600	45,4	[3]
	800	52,45	[22]
KF	200—300	45,0	[16]
	300—352	33,3	[16]
KH	300—673	36	[39]
KH_2PO_4 (КДР, дигидрофосфат калия)			
($\alpha_{\parallel}$)	120	34,3	[3]
	200	34,3	[3]
	300	34,3	[3]
($\alpha_{\perp}$)	120	21,6	[3]
	200	21,6	[3]
	300	21,6	[3]
KI	30	10,3	[3]
	50	19,3	[23]
	100	30,3	[3]
	200	35,8	[23]
	300	41,2	[3]
$KNaC_4H_4O_6 \cdot 2H_2O$ (сегнетова соль)	190—200	38,0	[3]
	200—300	40	[3]
LaB_6	293	40,2	[3]
LaF_3	300	6,4	[38]
LaH_2	300	20,0	[29]
La_2O_3	300—923	10,6	[39]
	300—473	8,45	[31]
	300—1273	12,01	[37]
LaS	300	11,6	[25]
La_2S_3	300	9,9	[25]
La_2Se_3	300	11,9	[25]
La_2Si_3	300—1373	8,7	[16]
LiBr	100—200	39,3	[16]
	200—300	46,6	[16]
LiCl	273—350	46,6	[16]
LiF	273—350	40,6	[16]
	30	0,24	[3]
	50	2,96	[3]
	100	15,2	[3]
	200	28,1	[3]
	300	33,7	[3]
LiI	100—200	47	[16]
	200—300	55,7	[16]
	273—350	56	[16]
$LiNbO_3$ ($\alpha_{\parallel}$)	100	1,0	[24]
	200	3,8	[24]
	300	4,0	[24]
	400	2,0	[24]
	600	2,0	[24]
$LiNbO_3$ ($\alpha_{\perp}$)	100	1,9	[24]
	200	8,5	[24]
	300	15,7	[24]
	400	17,5	[24]
	600	19,0	[24]
$LiTaO_3$ (α_a)	300	12,0	[24]
(α_c)	300	4,2	[24]
Lu_2O_3	300	7,8	[31]
MgF_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300	13,42	[1]
	400	14,49	[1]
	600	16,86	[1]
	800	20,24	[1]
($\alpha_{\perp}$)	300	9,44	[1]
	400	10,17	[1]
	600	12,59	[1]
	800	15,77	[1]
MgO	293—373	11,7	[31]
	293—873	12,9	[37]
Mg_2Si	30	0,08	[1]
	50	0,74	[1]
	100	5,49	[1]
	200	12,31	[1]
	300	13,96	[1]
Mg_2Sn	30	0,85	[1]
	50	3,2	[1]
	100	9,2	[1]
	200	14,9	[1]
	300	16,0	[1]
MnF_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300	12,6	[28]
($\alpha_{\perp}$)	300	3,5	[28]
MnS	100	17,3	[1]
	156,7	49,9	[1]
	200	11,6	[1]
	300	17,3	[34]
MnS_2	293—343	11,1	[16]
MnO_2 (α_a)	300—773	6,69	[37]
(α_c)	300—773	6,93	[37]
MoC	285—463	7,8	[16]
	300—1073	6,15	[16]
Mo_2N	293—1373	6,2	[16]
MoS_2	300—1273	10,7	[34]
MoSi	293—1073	16,3	[16]
$MoSi_2$	293—1723	5,1	[16]
NH_4Br	300	59,3	[16]
NH_4Cl	313	62,5	[16]
$NH_4H_2PO_4$ (α_a)	200	87	[3]
	290	80	[26]
(α_b)	200	40	[3]
	290	35	[26]
(α_c)	200	41	[3]
	290	61	[26]
NaBr	100—200	31,0	[16]
	200—300	36,7	[16]
	288—333	45,5	[16]
NaCl	100	35,9	[16]
	200	37	[16]
	300	39,6	[16]
NaF	90—300	23,0	[3]
	300	33,13	[3]
	468	35,9	[16]
NaH	300—673	64,0	[39]
$NaNO_3$	323	11	[16]
	400	12,4	[16]

Вещество	T, ΔT, K	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} K^{-1}	Литература
Na_2WO_4	300	18,2	[16]
NbB_2	300—1273	8,0	[34]
NbC	300—773	6,25	[32]
NbN	300—1273	10,1	[34]
Nb_2O_5	300—473	0,0	[31]
	473—673	—1,2	[31]
	300—1073	5,8	[31]
	300—1273	10,0	[34]
Nb_2S_3	300—1273	7,3	[16]
NdB_6	473	5,53	[37]
Nd_2O_3	1073	11,37	[25]
Nd_2O_2Te	300	12,5	[25]
NdS	300	15,4	[25]
Nd_2S_3	300	12,9	[25]
Nd_2Se_3	300	13,5	[25]
NiO	300	10	[31]
	473	13,0	[37]
	675	13,5	[37]
Ni_2P	300—1073	15,05	[34]
Ni_3P	300—1073	12,65	[34]
NiS	100	0,03	[3]
	200	—13,5	[3]
	300	1,1	[3]
NiSe	100	8,7	[3]
	200	29,5	[3]
	300	20,0	[3]
Ni_2Si	300—1143	16,5	[34]
NiTe	100	7,5	[3]
	200	24,0	[3]
	300	15,0	[3]
$PbCl_2$	293—393	31	[13]
$PbNO_3$	348—453	31,6	[16]
PbO_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300	9,3	[28]
($\alpha_{\perp}$)	300	8,4	[28]
PbS	30	7,54	[1]
	50	12,4	[1]
	100	17,6	[1]
	200	19,8	[1]
	300	20,3	[1]
PbSe	30	7,65	[1]
	50	12,9	[1]
	100	17,4	[1]
	200	18,9	[1]
	300	19,8	[1]
PbTc	30	9,02	[1]
	50	14,3	[1]
	100	17,7	[1]
	200	19,6	[1]
	300	19,8	[1]
$PbTiO_3$	800	8,3	[13]
$PbTi_{0,48}$, $Zr_{0,52}O_3$ (α_1)	300	1,0	[40]
	400	2,0	[40]
	600	4,0	[40]
(α_3)	300	4,0	[40]
	400	2,0	[40]
	600	—5	[40]
$PbZrO_3$	600	11,0	[18]
PrB_6	300	7,5	[38]
Pr_2O_3	293—373	8,0	[31]
	293—1273	8,3	[37]
$Pr_2O_2Te_2$	300	10,4	[25]
PrS	300	14,3	[25]
Pr_2S_3	300	11,3	[25]
Pr_2Se_3	300	13,0	[25]
PuC	300—1053	10,7	[34]
Pu_2C_3	300—1053	14,7	[34]
PuO_2	300—773	9	[31]
	400—1184	15,2	[31]
RbBr	100—200	32,3	[16]
	200—300	34,7	[16]
RbCl	100—200	30,5	[16]
	200—300	32,8	[16]
$RbHSO_4$ (α_a)	100	50	[3]
	200	60	[3]
	300	60	[3]
(α_b)	100	30	[3]
	200	50	[3]
	300	33	[3]
(α_c)	100	35	[3]
	200	49	[3]
	300	70	[3]
RbI	100—200	37,3	[16]
	200—300	39,7	[16]
$RbHSO_4$ (α_a)	300	60	[3]
(α_b)	300	33	[3]
(α_c)	300	70	[3]
Rh_2O_3 ($\alpha_{\parallel}$)	300	5,25	[31]
($\alpha_{\perp}$)	300	5,35	[31]
RuO_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300	—1,4	[28]
($\alpha_{\perp}$)	300	7,0	[28]
Sb_2O_3	313	19,63	[16]
Sb_2S_3	573—773	17	[1]
SbSI ($\alpha_{\parallel}$)	300	15	[3]
($\alpha_{\perp}$)	300	42	[3]
Sb_2Se_3	573—773	16	[1]
Sb_2Te_3	573—773	12	[1]
ScB_2 (α_c)	300—873	7,6	[34]
(α_a)	300—873	6,8	[34]
Sc_2O_3	300—673	8,5	[31]
α-SiC	100	0,3	[1]
	200	1,2	[1]
	300	2,8	[1]
($\alpha_{\parallel}$)	400	4,0	[1]
	600	4,6	[1]
	800	4,7	[1]
($\alpha_{\perp}$)	400	3,9	[1]
	600	4,2	[1]
	800	4,3	[1]
β-SiC	100	0,3	[1]
	200	1,2	[1]
	300	2,8	[1]
	400	4,0	[1]
	600	4,5	[1]
	800	4,5	[1]
Si_3N_4	300	2,7	[29]
SiO_2 (плавл.)	4	—0,2	[1]
	10	—2,75	[1]
	30	—8,54	[1]
	50	—8,46	[1]
	100	—6,10	[1]
	200	0,45	[1]
	300	4,50	[1]

Вещество	T, ΔT, K	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} K^{-1}	Литература
SiO_2	400	6,10	[1]
	600	6,25	[1]
	800	4,80	[1]
($\alpha_{\parallel}$)	300—673	4,1	[31]
($\alpha_{\perp}$)	300—673	6,6	[31]
Sm_2O_3	300—1073	10,8	[37]
Sm_2O_2Te	300	13,5	[25]
SmS	100	7,2	[3]
	200	11,3	[3]
	300	11,8	[3]
Sm_2Se_3	300	14,8	[25]
SnO_2 ($\alpha_{ср}$)	300	3,4	[31]
($\alpha_{\parallel}$)	300—680	5,6	[31]
($\alpha_{\perp}$)	300—680	4,3	[31]
α-SnS ($\alpha_{ср}$)	300	14,1	[1]
β-SnS ($\alpha_{ср}$)	300	15,0	[1]
α-SnSe ($\alpha_{ср}$)	300	16,9	[1]
(α_a)	300	—26,6	[1]
(α_b)	300	26,7	[1]
(α_c)	300	35,5	[1]
β-SnSe ($\alpha_{ср}$)	300	22,1	[1]
$SnTe$	30	6,4	[1]
	50	14,0	[1]
	100	17,6	[1]
	200	20,4	[1]
	300	20,8	[1]
SrB_6	300	6,7	[38]
(SrBi)TiO_3	300	9	[24]
SrF_2	30	0,4	[1]
	50	2,1	[1]
	100	8,5	[1]
	200	15,7	[1]
	273	17,5	[1]
$Sr(NO_3)_2$	348	32,2	[16]
SrO	300	13,9	[31]
SrO_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300	3,6	[28]
($\alpha_{\perp}$)	300	3,3	[28]
$SrTiO_3$	300	9,4	[13]
TaB_2	300—1273	8,2	[34]
TaC	300—773	6,29	[27]
TaN	300—973	3,6	[34]
Ta_2N	300—1273	5,2	[16]
Ta_2O_5	300—673	0,8	[31]
TaS_2	300	13,9	[25]
$TaSi_2$	300—1273	8,85	[16]
TbB_6	300	7,8	[38]
$TbBi$	300	9,8	[3]
$TbO_{1,81}$	300—1273	3	[31]
ThB_6	300	5,8	[34]
	300—1073	7,8	[38]
ThC	300	6,53	[34]
ThO_2	300—673	7,1	[31]
	300—873	7,7	[31]
ThS	300—1053	10,2	[34]
TiB_2	290—673	5,5	[16]
TiC	100	6,2	[3]
	200	6,8	[27]
	300	7,3	[3]
TiI_4	243—398	74	[16]
TiN	300	4,7	[34]
	300—1373	9,35	[34]
TiO	300	6,73	[31]
TiO_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300	9,80	[31]
	300—673	10,1	[31]
	670—1073	10,8	[31]
($\alpha_{\perp}$)	300	7,44	[31]
	300—673	8,0	[31]
	670—1073	8,3	[31]
Ti_6O	300—400	4,5	[31]
TiP	300	8,2	[34]
Ti_2S_3	300—1273	17,0	[34]
TlB_2	300—1573	8,1	[16]
$TlBr$	243—398	51,2	[16]
$TlCl$	288—333	54,6	[17]
TlI	300	45,0	[16]
Tm_2O_3	373—573	7,1	[31]
UB_2 (α_a)	300—573	9,0	[34]
(α_c)	300—573	8,0	[34]
UB_4	300—1273	7,0	[34]
UC	300—1273	10,4	[34]
UN	318—1273	8,61	[34]
UO_2	300—673	9,2	[31]
	673—1073	10,8	[41]
US	300—1253	11,9	[34]
VC	100	5,7	[28]
	200	6,2	[28]
	300	6,6	[3]
	300—573	7,2	[27]
V_3N	300—1373	8,1	[34]
WB_4	300	5,8	[34]
W_2B	300	6,7	[34]
WC	300—673	3,84	[27]
WSi_2	300—700	6,25	[34]
YbB_6	300	5,8	[34]
Yb_2O_3	373—573	4,9	[31]
	300—1273	9,30	[31]
$YAlO_3$	300	~7	[29]
$Y_3Al_5O_{12}$	100	4,25	[20]
	200	5,8	[29]
	300	7,5	[20]
$Y_3AlFe_4O_{12}$	200	6,3	[3]
	300	8,5	[30]
	600	11,1	[3]
YB_2 (α_a)	300	9,4	[34]
(α_c)	300	8,5	[34]
YB_6	300	6,2	[38]
$Y_3Fe_5O_{12}$	200	7,0	[29]
	300	8,3	[30]
	600	11,0	[30]
$Y_{1,5}Gd_{1,5}Fe_5O_{12}$	200	6,3	[30]
	300	8,1	[3]
	623	10,4	[30]
Y_2O_3	473	6,9	[13]
	1073	8,1	[13]
YVO_4	300	20	[29]
Zn_3As_2	300	10,4	[3]
$ZnCl$	300—433	29	[16]
ZnF_2 ($\alpha_{\parallel}$)	300	11,3	[28]
($\alpha_{\perp}$)	300	8,6	[28]
$ZnGeAs_2$	300	1,0	[25]
ZnO ($\alpha_{\parallel}$)	30	—0,48	[3]
	50	—0,88	[31]
	100	—0,62	[3]
	200	1,58	[31]

Вещество	T, ΔT, К	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} K^{-1}	Литература
ZnO ($\alpha_{\parallel}$)	300	2,92	[3]
	300—673	5,0	[34]
($\alpha_{\perp}$)	30	—0,27	[3]
	50	—0,50	[31]
	100	—0,04	[3]
	200	2,88	[31]
	300	4,75	[3]
	300—673	5,5	[34]
Zn_3P_2	300	8,33	[3]
ZnS (куб.)	50	—0,34	[1]
	100	1,72	[1]
	200	5,17	[1]
	300	6,0	[1]
	600	6	[1]
	800	6	[1]
ZnS (гекс.)	100	2,0	[1]
	200	5,0	[1]
	300	6,1	[1]
	800	6	[1]
ZnSe	30	—2,87	[1]
	50	—1,51	[1]
	100	2,57	[1]
	200	5,86	[1]
	300	7,14	[1]
ZnSe	400	8,17	[1]
	600	9,97	[1]
	800	11,69	[1]
$ZnSnAs_2$	300	2,3	[25]
ZnTe	30	—0,72	[1]
	50	0,36	[1]
	100	4,17	[1]
	200	7,58	[1]
	300	8,29	[1]
	400	8,7	[1]
	700	9,65	[1]
ZrB_2	300—1073	5,9	[34]
ZrC	100	5,1	[3]
	200	5,8	[32]
	300	6,1	[27]
	300—873	6,80	[3]
ZrN	300—1373	7,24	[34]
ZrO_2	300—453	4,5	[31]
	300—873	8,4	[37]
ZrS_2	300—1273	11,7	[34]
$ZrTiO_4$	300	7,5	[24]

Таблица 10.3. **Температурный коэффициент линейного расширения неорганических соединений при температуре выше 1000° С. Приведены значения истинного ТКЛР α (при данной температуре T) или среднего ТКЛР $\bar{\alpha}$ (в интервале ΔT)**

Вещество	T, ΔT, К	α, $\bar{\alpha}$, $10^{-6}K^{-1}$	Литература
Al_2O_3	20—1000	8,1	[31]
	20 –1200	9,1	[37]
	20—1400	9,8	[31]
	20—1600	10,3	[37]
	20– 1800	10,6	[31]
	20—2000	9,14	[37]
($\alpha_{\parallel}$)	1027	11,04	[37]
	1727	11,99	[37]
($\alpha_{\perp}$)	1027	9,97	[37]
	1727	10,75	[37]
B_4C	80—1000	4,6	[34]
	1200	3,1	[34]
BeO	20—1000	9	[31]
	20—1200	10,1	[37]
	20—1400	10,3	[31]
	20—1600	10,7	[37]
	20—1800	10,85	[31]
	20—2000	10,95	[37]
	1200—2000	13,4	[37]
CaO	20—1000	14,2	[31]
	20—1200	14,75	[37]
	20—1600	15,71	[31]
	20—1800	16,02	[37]
	20—2000	16,29	[31]
Cd_2O_2	20—1000	10,5	[37]
	20—1400	10,5	[37]
CeO_2	20—1000	8,5	[37]
	20—1200	12,5	[37]
CrB	20—1000	12,3	[34]
	1000—2000	12,6	[34]
Cr_3C_2	20—1000	11,7	[27]
	20—1200	11,7	[27]
Cr_2O_3	20—1400	9,6	[31]
Eu_2O_3	20—1000	10,3	[37]
	20—1200	10,3	[37]
	20—1600	10,4	[37]
HfB_2	20—1000	6,3	[34]
	1100—2100	6,8	[34]
HfC	20—1000	6,6	[15]
	20—1200	6,67	[32]
	20—1400	6,8	[15]
	20—1600	6,87	[32]
	20—1800	6,66	[15]
	20—2000	6,8	[32]
	20—2200	6,9	[15]
	20—2900	8,0	[32]
HfO_2	250—1300	5,8	[37]
	20—1700	6,45	[37]
MgO	20—1000	14,2	[31]
	20—1200	15,38	[31]
	20—1400	15,95	[31]
	20—1600	16,47	[31]

Вещество	T, ΔT, K	α, $\bar{\alpha}$, $10^{-6}K^{-1}$	Литература
MgO	20—1800	17,08	[31]
	20—2000	17,49	[31]
	20—2200	18,60	[31]
MoC	20—1000	6,4	[27]
	20—1200	6,7	[27]
	20—1400	7,0	[27]
	20—1600	7,35	[27]
	20—1800	7,6	[27]
	20—2100	9,75	[27]
NbB_2	20—1000	8,0	[34]
	20—2000	8,5	[34]
NbC	20—1000	6,88	[27]
	20—1200	6,90	[27]
	20—1400	6,92	[27]
	20—1600	7,15	[27]
	20—1800	7,41	[27]
	20—2000	7,57	[27]
	20—2900	8,02	[27]
Nd_2O_3	1000	11,37	[27]
	100—1000	11,8	[37]
NiO	1000	14,1	[37]
	1400	14,9	[37]
	1800	16,3	[37]
Sc_2O_3	20—900	7,6	[37]
	20—1800	7,7	[37]
Sm_2O_3	20—1000	9,9	[37]
	20—1400	9,3	[37]
TaB_2	20—1000	8,2	[34]
	1000—2000	8,8	[34]
TaC	20—1000	6,64	[27]
	20—1200	6,67	[27]
	20—1400	6,89	[27]
	20—1600	7,29	[27]
	20—1800	7,59	[27]
	20—2000	7,94	[27]
	20—2900	8,81	[27]
ThO_2	20—1000	9,4	[31]
	20—1200	10,3	[31]
	20—1400	10,4	[31]
ThO_2	1400—1970	12,31	[37]
	2000—2300	13,3	[37]
TiB_2	20—1000	4,6	[34]
	1000—2000	5,2	[34]
TiN	20—1000	7,5	[34]
	20—1200	7,5	[34]
	20—1400	7,9	[34]
	20—1600	8,1	[34]
	20—1800	8,3	[34]
	20—2000	8,5	[34]
	20—2200	9,1	[34]
	20—2700	9,6	[34]
UO_2	800—1260	12,9	[41]
VB_2	20—1000	7,6	[34]
	20—2000	8,3	[34]
VC	20—1000	6,25	[27]
	20—1200	6,60	[27]
	20—1400	6,95	[27]
	20—1600	7,45	[27]
	20—1800	8,10	[27]
	20—2000	8,95	[27]
	20—2200	9,60	[27]
WC	20—1000	4,87	[27]
	0—2400	7,3	[27]
Yt_2O_3	1000	8,3	[31]
	1200	8,6	[31]
	1400	8,8	[31]
	1600	9,1	[31]
	1800	9,3	[31]
ZrB_2	20—1000	5,9	[34]
	1000—2000	6,5	[34]
ZrC	20—1000	6,99	[27]
	20—1300	7,20	[27]
	20—1800	8,1	[27]
	20—2400	8,77	[27]
ZrO_2	20—1000	9,1	[31]
	20—1200	9,5	[31]
	20—1400	9,47	[37]
	20—2100	13,0	[37]

Таблица 10.4. Средний температурный коэффициент линейного расширения кварцевых и оптических стекол $\bar{\alpha}$, 10^{-7} K^{-1} [4, 42, 43] (Если температура отличается от указанной, ее значение приводится в круглых скобках)

Марка стекла	ΔT, K			
	170—293	210—293	293—300	293—400
Кварцевые стекла				
КЛР-1	—1,5 (223—293)		—1,0 (273—293)	
КЛР-2	—1,9 (223—293)		—1,0 (273—293)	
КЧГ	4,2 (223—293)		4,5 (273—293)	
КУ-2, КВ (истинный ТКЛР, α, 10^{-7} K^{-1} [61])				
	—1,10 (170)	1,40 (210)	4,7 (293)	
	6,1 (473)	5,3 (673)	3,4 (1073)	
Пирекс	28,2	29,2	39,2	
Оптические стекла				
ЛК1	110	111	112	113
ЛК3	85	86	88,4	92
ЛК4	49	50	51,5	52
ЛК5	32,0	33,0	34,4	35

Продолжение табл. 10.4

Марка стекла	ΔT, K			
	170—293	210—293	293—300	293—400
ЛК6	78,0	80,0	81,4	83
ЛК7	38,0	40,0	41,3	44
ЛК8	—	54,0	55,3	56
ЛК103	—	84,0	86,4	—
ЛК105	—	32,0	34,5	—
ЛК107	—	40,0	41,2	—
ФК1	83,0	84,0	87,2	91
ФК3	—	—	—	78
ФК4	—	—	—	107
ФК13	61,0	62,0	68,2	73
ФК14	—	88,0	92,0	98
ФК113	—	63,0	64,0	(273—293)
ФК114	—	87,0	92,0	(273—293)
К1	59,0	60,0	62,7	65
К2	56,0	57,0	60,3	64
К3	72,0	74,0	77,3	83
К5	66,0	67,0	70,3	74
К8	66,0	68,0	73,2	76
К14	61,0	62,0	66,0	70
К15	79,0	81,0	89,0	93

Продолжение табл. 10.4

Марка стекла	ΔT, К			
	170—293	210—293	293—300	293—400
К17	64,0	66,0	69,4	74
К18	62,0	64,0	67,4	71
К19	72,0	74,0	76,5	80
К20	68,0	69,0	71,3	75
К100	—	70,0	73,5	(273—293)
К108	—	66,0	69,3	(273—293)
К119	—	70,0	73,5	(273—293)
ОК1	—	—	—	136
БК4	73,0	74,0	76,2	80
БК6	73,0	74,0	77,1	83
БК8	55,0	56,0	59,1	63
БК9	67,0	68,0	72,1	76
БК10	63,0	65,0	67,0	72,5
БК11	59,0	60,0	62,1	66,5
БК12	70,0	71,0	73,1	77
БК13	61,0	62,0	65,1	68,9
БК104	—	71,0	74,2	—
БК106	—	75,0	78,3	—
БК110	—	65,0	67,2	—
ББК1	—	—	—	99
ББК2	—	—	—	94
ТК1	58,0	59,0	60,2	61
ТК2	63,0	64,0	67,2	70
ТК3	—	54,0	—	60
ТК4	58,0	59,0	62,2	66
ТК7	—	67,0	—	73
ТК8	60,0	62,0	66,2	70
ТК9	67,0	68,0	72,1	76
ТК12	57,0	58,0	61,2	65
ТК13	60,0	61,0	64,1	67
ТК14	61,0	63,0	65,1	69
ТК16	63,0	66,0	69,1	71
ТК17	68,0	68,0	72,2	75,5
ТК20	66,0	67,0	70,1	73
ТК21	72,0	73,0	76,1	81
ТК23	51,0	52,0	55,2	58
ТК104	—	58,0	61,3	—
ТК109	—	68,0	71,2	—
ТК114	—	60,0	63,3	—
ТК115	—	63,0	66,3	—
ТК121	—	72,0	75,2	—
ТК123	—	50,0	54,4	—
СТК3	69,0	71,0	74,0	(273—293)
СТК7	82,0	84,0	88,0	(273—293)
СТК8	83,0	84,0	87,0	(273—293)
СТК9	50,0	51,0	54,0	(273—293)
СТК10	43,0	45,0	49,0	(273—293)
СТК12	49,0	57,0	61,0	(273—293)
СТК15	—	57,0	59,0	(273—293)
СТК16	—	58,0	61,0	(273—293)
СТК19	—	51,0	53,0	(273—293)
КФ1	62,0	63,0	64,2	66
КФ3	—	83,0	—	91
КФ4	62,0	63,0	66,2	71
КФ5	59,0	59,0	60,1	62
КФ6	60,0	62,0	65,3	68
КФ7	54,0	55,0	57,3	60
КФ8	70,0	72,0	74,1	76
БФ1	65,0	66,0	69,2	72,5
БФ4	69,0	70,0	72,1	74
БФ6	76,0	77,0	80,1	83
БФ7	67,0	68,0	71,2	75
БФ8	76,0	77,0	79,2	82
БФ11	61,0	63,0	67,2	70
БФ12	82,0	83,0	85,2	87,5

Продолжение табл. 10.4

Марка стекла	ΔT, К			
	170—293	210—293	293—300	293—400
БФ13	59,0	61,0	65,2	68
БФ16	76,0	78,0	81,2	84
БФ18	71,0	72,0	75,2	79
БФ19	69,0	70,0	73,2	76
БФ21	70,0	71,0	74,1	77
БФ23	69,0	70,0	71,2	73
БФ24	72,0	74,0	76,2	79
БФ25	65,0	66,0	69,1	73
БФ26	63,0	64,0	67,2	70
БФ27	74,0	75,0	77,1	80
БФ28	58,0	59,0	62,2	65
БФ32	—	103	107	—
БФ101	—	66,0	69,8	—
БФ104	—	69,0	72,0	—
БФ106	—	76,0	79,0	—
БФ112	—	78,0	82,0	—
БФ125	—	65,0	69,0	—
ТБФ3, 4	63,0	65,0	69,0	(273—293)
ТБФ5	—	54,0	58,0	64
ТБФ7	—	58,0	61,0	(273—293)
ТБФ8	—	55,0	58,0	(273—293)
ТБФ25	—	55,0	59,0	(273—293)
ЛФ1	79,0	80,0	83,2	84,5
ЛФ5	66,0	67,0	69,4	72
ЛФ7	70,0	71,0	73,3	74,5
ЛФ8	83,0	84,0	87,5	90
ЛФ9	80,0	81,0	85,5	89
ЛФ10	71,0	72,0	74,6	78
ЛФ11	70,0	71,0	72,8	74
ЛФ12	85,0	86,0	88,3	91
ЛФ105	—	67,0	70,0	—
Ф1	70,0	71,0	72,2	74
Ф2	69,0	70,0	72,2	75
Ф4	72,0	73,0	74,1	75,5
Ф6	69,0	70,0	72,2	74
Ф7	68,0	70,0	72,2	74,5
Ф8	94,0	95,0	98,1	101
Ф9	89,0	90,0	93,1	96,5
Ф13	69,0	71,0	72,2	74,5
Ф18	—	106	109	—
Ф101	—	69,0	70,5	—
Ф104	—	70,0	71,3	—
Ф106	—	68,0	70,2	—
Ф108	—	91,0	95,0	—
Ф109	—	90,0	92,5	—
Ф113	—	68,0	70,4	—
ТФ1	81,0	82,0	84,3	86,5
ТФ2	71,0	73,0	75,3	79
ТФ3	76,0	77,0	81,0	82,5
ТФ4	76,0	77,0	80,4	82
ТФ5	77,0	78,0	81,3	83
ТФ7	92,0	93,0	95,3	96
ТФ8	76,0	77,0	79,3	82
ТФ10	74,0	75,0	77,4	82
ТФ11	95,0	97,0	104	108
ТФ103	—	75,0	77,3	—
ТФ107	—	88,0	90,4	—
ТФ110	—	75,0	77,3	—
ОФ1	58,0	59,0	61,4	63
ОФ2	69,0	70,0	72,2	74
ОФ3	46,0	48,0	51,3	55,5
ОФ4	46,0	48,0	51,3	52
ОФ5	44,0	46,0	49,0	53
ОФ101	—	58,0	60,4	—

Таблица 10.5. **Температурный коэффициент линейного расширения технических стекол. Приведены значения истинного ТКЛР α (при данной температуре) или среднего ТКЛР $\bar{\alpha}$ (в интервале температур)**

Стекло	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-7} K^{-1}	Стекло	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-7} K^{-1}
Лазерные стекла СССР. 300—400 K [20, 29]			
ГСЛ-1	94	ГСЛ-21—ГСЛ-24	106*1
ГСЛ-2	119	ЛГС-247-2	116
ГСЛ-3	121	КГЗ-3	105*1
ГСЛ-4	103	КГС-5	104*1
Зарубежные лазерные стекла, 300 K [20]			
FG_1	80	LG_1	99,5
FG_2	70	LG_2	102,0
FG_3	60	LG_3	104,0
LG-52	78	LG_4—LG_6	54,9
LG-54	95		
LG-55	107	Ba—крон	110,0
Волоконно-оптическое стекло, 300 K [43]			
Оболочечное, ВО	53	Волоконно-оптические пластины, ВОП	32—73
Сердцевинное, ВС	92		
Оптическая керамика, 300—400 K [43, 44]			
КО1	113	КО4	77
КО2	69	КЭО10	24
КО3	109,9	—	—
Инфракрасные стекла, 293—393 K [3, 17, 43]			
ИКС22	226	Иртран-1	107
ИКС23	246	Иртран-2	66
ИКС24	182	Иртран-3	202*2
ИКС25	220	Иртран-4	77*2
ИКС26	166	Иртран-5	120*2
ИКС27	177	Иртран-51	115*2
ИКС28	220	KRS-5	580
ИКС30	122	KRS-6	560
К515	82	KRS-13	391*1
Резисторные стекла, 293—393 K [29]			
С27-1	27	С74-1	74
С36-1	36,5	С77-1	77
С41-1	41	С84-2	84
С63-1	63	—	—
Изоляторные стекла, 293—393 K [29]			
13В	58	N1	94
Электровакуумные стекла [29], 293—373 K			
С37-1	37,5	С40-1*3	40,0
С38-1*3	38,0	С47-1*4	47,0
С39-1*3	39,5	С48-1*4	48,0
С49-1*5	49,0	С89-1*7	89,0
С49-2*5	49,0	С89-2	89,0
С51-1*6	51,0	С89-6	89,0
С51-2*6	51,0	С90-1	90,0
С87-1*7	87,0	Кварцевое	
С88-1*7	88,0	(300—350 K)	4,0
С88-2	88,0	(400—700 K)	6,0

Продолжение табл. 10.5

Стекло	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-7} K^{-1}	Стекло	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-7} K^{-1}
Термометрические стекла, 273—373 K [42]			
ГОСТ 1224—41	80	600	33
59^{III}	56,5	700	29,5
Лабораторные стекла, 300 K [42]			
Термостойкое	33,2	Щ23	65
N13	50	N 51-A	48
N23	89	Uninost	98
N29	89,3	Palex	64,9
Т16	50	Murano 1922 N	48
Т28	40	G20	49
Ц32	88,6	Multal	50
КС34	91	Sial	50,6
Щ14	87,1		
Щ26	57,3		
Легированные стекла 373—573 K [29, 45]			
Алюмоборосиликатное	30—60		
Алюмоборосиликатное бесщелочное	8—38		
Иттриевое	171		
Кальций-алюмосиликатное	80—100		
Натрий-алюмосиликатное	87		
Фторбериллиевое СЛК-5	160		
Фторфосфатное № 436	165		
Строительные стекла, 300—573 K [42]			
Листовое оконное	80—95		
Молочное глушеное	83		
Пеностекло	5—6		
Порошковое С25-1	25		
Порошковое С48-2	48		
Порошковое С84-8	89		
Сортовое бесцветное	90—99		
Стекло для труб	50		
Стекло для труб пирексовое	32		
Стеклоцемент СЦ90-1	97		
Стекло цветное оптическое	<70		
Хрустальное свинцовое	94—105		
Стеклоэмали	70—120		
Микалес	80—90		

*1 При 300 K.

*2 В интервале 293—573 K.

*3 Спаивается с W, Н30К13Д.

*4 Спаивается с Mo, 29НК.

*5 Спаивается с 29НК.

*6 Спаивается с Mo.

*7 Спаивается с Fe — Cr — Ni-сплавом.

Таблица 10.6. **Средний температурный коэффициент линейного расширения ситаллов $\bar{\alpha}$, 10^{-7} K^{-1} [29, 42, 44]**

Марка	ΔT, K					
	213—293	293—393	393—473	473—573	573—673	673—773
СТЛ-1	—12,5	—8	—5,4	—2,1	1,2	3,6
СТЛ-2	—10	—6	—2,5	2,7	5,3	5,6
СТЛ-3	—2,5	0,6	3	0,5	6,5	9
СТЛ-4	—1,3	2	5,3	7,3	13,6	15,9
СТЛ-5	—0,8	5	5,6	6	7	19,5
СТЛ-6	2,5	7	8,8	11	13	14
СТЛ-7	6,2	12	12,5	13	15	16
СТЛ-8	10	16	16,2	16,5	17	18
СТЛ-9	—	38,1	38,1	38,1	38,1	38,1
СТЛ-10	80	100	106,2	125	120	90
СТМ-1	11	27	31,2	32	34	37
СТМ-2	—	44	51,2	56	56	57
СТБ-1	27.5	29	32,5	37	38	60
СТБ-3	21	30	31,2	33	48	88
СО115М	0,0(1,5) (213—313K)		2,5—6 (293—693 K)			
СО-21	—	—	—2,5(293—693 K)		5,3	—
СО-15	—	—	—	—	6,5	—
С-15-12	—	—	—	—	1,2	—

Таблица 10.7. **Температурный коэффициент линейного расширения чугуна [3, 4, 5]. Приведены значения истинного ТКЛР α (при данной температуре T) или среднего ТКЛР $\bar{\alpha}$ (в интервале ΔT)**

Марка или название	ΔT, T, °C	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} K^{-1}
СЧ 00, СЧ 10	20	10,0
СЧ 12-28, СЧ 15-32, СЧ 18-36, СЧ 21-40	20—200	11,8
СЧ 32-52	—77	11,2
ЖЧН15Д7Х2	20	20,0
АВЧ-1, АЧК-1	20	11
ЧМ 1,3, ЧМ 1,8	20—100	12,0
ПЧ, ПЧИ, ХТВ, ХНВ	20—600	13,6
Чугун:		
белый	20	7—11
	20—100	10
серый	20	11
ферритный ковкий	20—100	11
	20—300	12,3
	20—500	13,6
	20—700	14,7
аустенитный	20—100	17
никелевый (14 % Ni)	20—600	18,0
хромистый (34,2 % Cr)	20—600	11,0
Составляющие чугуна:		
аустенит	20—100	17—24
феррит	20—100	12—12,5
перлит	20—100	10—11
цементит	20—100	6—8,5
графит	20—100	7,5—8

Таблица 10.8. **Температурный коэффициент линейного расширения сталей. Приведены значения среднего ТКЛР $\bar{\alpha}$, 10^{-6} K^{-1}, в интервале от 300 K до указанной температуры или значения истинного ТКЛР α, 10^{-6} K^{-1}. Марки сталей расположены в порядке увеличения содержания легирующих добавок**

Марка стали	Температура, K										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	
Углеродистые стали											
3, 3кп (α)		5,50 (100 K)		10,1 (200 K)		11,8 (300 K)		—	—	—	[5]
0,8кп (α)	11,6	12,32	13,02	13,65	14,22	14,64	15,01	—	—	—	[16]
10	11,6	12,6	13,0	14,6	—	—	—	—	—	—	[5]
15	12,2	12,3	13,1	13,5	14,3	14,3	15,25	14,1	13,2	13,3	[16]
20, 20кп	11,1	12,1	12,8	13,4	13,9	14,4	14,8	12,9	—	—	[16]
25	12,2	12,7	13,1	13,5	13,9	14,4	14,9	—	—	—	[16]
25Л (α)	11,5	12,9	13,0	13,2	13,5	13,8	—	—	—	—	[16]
30 (α)	12,9	14,5	15,8	15,8	16,7	16,2	16,4 (923 K)		—	—	[16]
35	11,09	11,89	13,42	14,02	14,43	—	—	—	—	—	[16]
40	11,21	13,0	13,0	13,58	14,05	14,58	14,58	11,85	12,65	13,59	[16]
45	11,59	12,32	13,09	13,71	14,18	14,68	15,08	12,50	13,56	14,45	[16]
50 (α)	4,90 (100 K)		9,30 (200 K)		10,9 (300 K)		—	—	—	—	[16]
	12,0	12,4	12,9	13,3	13,7	14,1	14,3	11,9	12,9	14,0	[16]
У8 (α)	12,1	14,0	12,8	16,1	16,8	17,8	19,8 (923 K)		—	—	[16]
У9 (α)	12,1	13,7	15,3	16,4	17,3	17,2	17,6 (923 K)		—	—	[16]
У12 (α)	11,7	13,3	15,4	16,2	17,1	18,3	18,9 (923 K)		—	—	[16]

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	
Хромистые стали											
15Х, 15ХА, 20Х	11,3	11,6	12,3	13,2	13,7	14,2	—	—	—	—	[5]
30Х	12,45	13,0	13,4	13,75	14,15	14,55	14,8	12,0	12,8	13,8	[5]
38ХА, 40Х (α)	—0,002 (5 К)		0,018 (10 К)		0,18 (20 К)	1,7 (50 К)		6,6 (100 К)	11,5 (200 К)		[46]
40Х	13,4	13,3	—	14,8	—	14,8	—	—	—	—	[5]
0Х13	10,5	11,1	11,4	11,8	12,1	12,3	12,5	12,8	—	—	[5]
1Х13	10,15	11,2	11,4	11,8	12,2	12,4	12,7	13,0	10,8	11,7	[5]
2Х13	10,2	11,2	11,5	11,9	12,2	12,8	12,8	13,0	—	—	[5]
3Х13	10,2	10,95	11,1	11,7	12,0	12,3	12,5	12,6	10,6	12,2	[5]
4Х13	10,65	11,5	11,85	12,2	12,5	12,75	12,95	13,2	—	—	[5]
ШХ15 (α)	14,0	15,1	—	15,5	—	15,7	—	—	—	—	[5]
08Х17	10,4	10,5	10,8	11,2	11,4	11,6	11,9	12,1	—	—	[37]
9Х18, 9Х18Ш	11,7	12,1	12,4	12,9	13,3	11,8	12,1	12,4	—	—	[5]
Х28	10,0	—	—	—	11,1	11,3	11,5	12,0	12,4	—	[5]
Хромоникельсодержащие низко- и среднелегированные стали											
40ХН, 45ХН	11,8	12,3	13,4	14,0	—	—	—	—	—	—	[5, 46]
18ХНВА	11,7	12,2	12,7	13,1	13,5	13,9	—	—	—	—	[5]
40ХНМА	11,7	12,2	12,7	—	—	—	—	—	—	—	[5]
35ХНМ, 34ХН1М	11,7	12,2	12,7	—	—	—	—	—	—	—	[5]
12ХН2	12,6	13,8	14,8	14,3	—	—	—	—	—	—	[5]
30ХН2МФА (α)	5,01 (70 К)		7,40 (100 К)		9,30 (200 К)		12,3 (300 К)		—	—	[3]
30ХН3	11,2	11,8	12,4	12,7	13,2	13,5	13,9	10,8	12,1	13,1	[5]
12ХН3А	11,8	13,0	14,0	14,7	15,3	15,6	—	—	—	—	[5, 46]
20ХН3А	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0	14,5	—	—	—	—	[5]
33ХН3МА, 34ХН3М	10,8	11,6	12,5	13,3	13,5	13,7	—	—	—	—	[5]
35ХН3МФ	11,8	12,1	12,6	13,0	13,4	13,7	—	—	—	—	[5]
0ХН3М (α)	5,0 (70 К)		7,60 (100 К)		9,45 (200 К)		11,6 (300 К)		—	—	[3]
12Х2Н4А	11,0	12,0	13,0	14,7	—	15,6	—	—	—	—	[5]
18Х2Н4МА (α)	—0,06 (5 К)		—0,064 (10 К)		0,32 (30 К)		6,5 (100 К)		10,0 (200 К)		[3, 46]
	—	11,2	12,5	13,1	13,7	13,8	13,8	—	—	—	[50]
Хромоникелевые стали с содержанием никеля меньше 20%											
13Х12НВ2МФ	11,0	11,3	11,6	12,0	12,3	12,5	—	—	—	—	[5]
4Х12Н8Г8МФБ	16,0	16,9	17,7	18,5	19,5	19,9	20,2	—	—	—	[5]
0Х12Н16БС4	16,45	16,7	17,4	17,65	17,85	18,1	18,3	18,55	18,65	—	[5]
2Х13Н2	10,54	10,64	10,64	10,84	11,09	11,34	—	—	—	—	[5]
1Х13Н2С2	10,78	11,41	11,82	12,26	12,71	13,12	13,32	—	—	—	[5]
03Х13Н8Д2ТМ	10,2 (77—300 К)			8,5 (20—300 К)			—	—	—	—	[51, 52]
Х13Н12М2В2Б1К10	15,6	15,8	16,5	16,9	17,1	17,3	17,7	18,0	—	18,6	[5]
Х13Н13В2Б	16,8	17,3	17,9	18,3	18,7	18,9	19,1	19,3	19,6	—	[5]
Х13Н13В2М2Б3К10	15,6	15,8	16,5	16,9	17,1	17,3	17,7	18,0	18,3	18,6	[5]
1Х13Н16Б	16,05	16,9	17,7	18,25	18,55	18,75	19,0	19,25	19,6	19,65	[5]
4Х14Н14В2М	—	—	17,0	—	18,0	—	18,0	—	19,0	—	[5, 37]
1Х14Н14В2М	17,0	17,8	18,3	18,8	19,0	19,2	19,4	19,9	20,5	—	[5]
1Х14Н14В2МТ	17,2	17,2	17,5	18,0	18,5	18,6	18,9	19,3	—	—	[5]
2Х14Н14В2СТ	16,1	16,7	17,2	17,4	17,8	18,2	—	—	—	—	[5]
Х14Н14МВФБ	15,1	15,9	16,9	18,0	18,2	18,4	19,0	—	—	—	[5]
Х14Н14М2В2ФБТ	—	—	—	16,7	17,1	17,4	17,8	18,1	—	—	[5]
09Х14Н16Б	15,2	16,5	17,1	17,55	17,96	18,41	18,91	20,6	—	—	[37]
1Х14Н18В2Б	16,5	17,4	17,6	18,0	18,1	18,2	18,5	19,0	19,0	—	[5]
Х14Н18В2БР	15,9	16,5	17,2	17,6	18,0	18,3	18,6	18,7	19,0	—	[37]
09Х14Н19В2БР1	15,2	16,3	17,2	17,6	18,0	18,1	18,6	18,6	—	—	[5, 37]
4Х15НГ7Ф2МС (α)	17,0	17,7	18,4	19,1	20,5	20,8	—	—	—	—	[5, 36]
	—	—	—	—	—	—	22,8	22,78	23,32	24,64	[5, 36]

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	
0Х15Н7М2Ю	9,9	10,8	11,1	11,5	11,7	11,4	10,3	11,2	11,9	—	[5]
1Х15Н9С3Б1 (α)	17,4	18,7	19,7	20,2	20,5	21,0	21,55	21,75	—	—	[5]
Х15Н15М2К3ВТ	15,75	16,6	17,15	17,6	18,25	18,6	—	—	—	—	[5]
0Х15Н15М3	16,9	17,7	18,1	18,5	18,8	19,1	19,45	19,7	19,9	—	[5]
0Х15Н15М3Б	16,35	17,05	17,4	17,65	17,7	17,85	18,25	18,6	18,75	—	[5]
Х16Н9М2	17,0	17,5	18,0	18,4	18,9	19,3	19,5	—	—	—	[5]
08Х16Н13М2Б	—	—	—	17,1	17,4	17,8	18,2	18,6	—	—	[37]
Х16Н14Б	16,0	—	18,0	—	18,0	—	—	19,0	—	—	[5]
1Х16Н16В3МБР	17,1	17,1	17,1	17,9	18,2	18,5	18,8	19,1	19,2	—	[5]
07Х16Н16	—	11,7	12,1	12,5	12,9	—	—	—	—	—	[51, 52]
Х16Н16В3МБ	15,8	16,8	17,3	17,6	17,8	17,9	18,1	18,2	—	—	[5]
2Х17Н1	8,1	8,76	10,26	10,04	10,54	11,54	—	—	—	—	[52]
2Х17Н2	10,54	10,67	10,94	10,84	11,24	11,34	—	—	—	—	[5]
1Х17Н2	10,3	10,4	10,7	11,1	11,8	—	—	—	—	—	[5]
0Х17Н4	9,7	10,2	10,6	10,9	11,2	11,3	9,6	9,6	10,2	—	[5]
0Х17Н4М2	10,6	11,0	11,4	11,6	11,9	11,7	11,1	11,7	12,3	—	[5]
Х17Н5М2	12,14	13,69	14,28	14,64	14,79	14,84	—	—	—	—	[5]
0Х17Н13М2Т	15,7	16,1	16,7	17,2	17,6	17,9	18,2	—	—	—	[3]
0Х18Н7Ю1	15,6	16,5	17,3	17,9	18,1	18,4	18,5	18,7	—	—	[5]
Х18Н9	16,5	17,2	17,7	18,1	18,3	18,6	18,9	19,3	19,7	20,2	[5, 37]
Х18Н9В	—	16,5	17,1	17,6	18,0	18,4	18,8	19,0	19,2	19,4	[5]
1Х18Н9ВМ	—	—	16,65	17,15	17,45	17,8	18,0	18,2	—	—	[5]
3Х18Н9В2ФТ	15,35	15,6	15,9	16,25	16,6	17,0	17,4	17,8	18,4	18,95	[5]
Х18Н9М	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	—	—	—	[5]
Х18Н9М2С2	16,6	17,0	17,35	17,7	18,05	18,4	18,75	19,1	19,4	19,75	[5]
Х18Н9С2	16,2	17,1	17,8	18,6	19,2	19,2	20,5	—	—	—	[5]
12Х18Н9Т (α)	0,8 (20К)		3,3 (50 К)		8,40 (100 К)		14,30 (200 К)		16,7 (300 К)		[3, 52]
12Х18Н10Т (α)	17,55 (400К)		17,99 (500 К)		19,36 (700 К)		21,10 (1000 К)		22,92 (1300 К)		[60]
Х18Н9Т	16,6	17,0	17,6	18,0	18,3	18,55	18,9	19,25	19,5	20,1	[5]
Х18Н9ТЛ	14,8	16,0	16,9	17,1	17,6	18,0	18,4	—	—	—	[5]
04Х18Н10 (α)	3,0 (20 К)		8,0 (50 К)		10,8 (100 К)		15,4 (200 К)		15,5 (300 К)		[46] [5]
Х18Н11Б	16,8	17,65	18,2	18,5	18,85	19,0	19,4	19,65	19,9	—	[5]
Х18Н12	16,8	17,2	17,6	17,8	18,2	18,5	18,8	—	—	—	[37]
0Х18Н12Б	16,0	18,0	18,0	19,0	—	—	—	—	—	—	[5]
Х18Н12М2Т	15,7	16,1	16,7	17,2	17,6	17,9	18,2	—	—	—	[5]
Х18Н12МФТР	15,9	16,9	17,6	17,8	17,9	18,4	18,8	19,0	19,2	—	[5]
Х18Н12М3	16,0	—	16,2	—	17,5	18,6	—	—	—	20,0	[5]
Х18Н12Т	16,6	17,0	17,2	17,5	17,9	18,2	18,6	18,9	19,3	—	[5]
Х18Н14М2Б1	—	—	—	17,6	17,8	18,2	18,7	—	—	—	[5]
Х18Н15М3БЮР2	14,95	16,15	16,8	17,1	17,5	17,75	18,15	18,35	18,25	—	[5]
Х18Н15М3БЮР4	15,05	15,75	16,4	17,15	17,35	17,6	17,85	18,1	18,45	—	[5]
1Х18Н15М3В2БК13	—	—	16,7	16,7	16,75	17,0	17,25	17,4	—	—	[5]
0Х18Н15Р4	16,5	17,4	17,8	18,15	18,45	18,85	19,2	19,45	19,8	—	[5]
0Х18Н15Р7	16,8	17,4	17,7	18,05	18,2	18,55	18,95	19,4	19,8	—	[5]
10Х18Н18Ю4Д	15,5	16,5	17,0	17,4	17,65	18,2	18,4	18,8	18,6	—	[37]
3Х19Н9МВБТ	16,65	16,9	17,2	17,5	17,8	18,15	18,5	18,9	19,3	19,7	[5]
Х19Н10М2Ф3БК47	14,8	15,0	15,1	15,2	15,3	15,9	16,4	16,8	17,2	—	[5]
Х19Н14Б2	17,0	17,2	17,4	17,6	17,9	18,6	18,8	—	—	—	[5]
2Х20Н11	17,3	—	17,8	—	18,4	18,7	—	—	—	—	[5]
Х20Н14С2	16,0	—	—	—	—	18,1	18,3	18,5	18,8	19,0	[5]
03Х20Н16АГ6 (α)	0,01 4 (К)		0,06 (20 К)		0,57(40 К)		8,27 (100 К)		16,10 (300 К)		[51,52]
07Х21Н5АГ7	9,3 (20—300 К)		11,5 (77—300 К)		14,6 (173—300 К)				—	—	[51]

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	
	15,7	16,0	16,8	17,3	18,0	18,4	18,5	—	—	—	[52]
0Х21Н5Т	9,6	13,8	16,0	16,0	16,4	16,2	16,5	16,7	17,1	—	[5]
12Х21Н5Т (α)	7,90 (100 К)		10,4 (200 К)		11,0 (300 К)		—	—	—	—	[3]
1Х21Н5Т	10,2	14,4	16,8	16,8	17,4	17,5	17,7	18,0	18,5	—	[5]
0Х21Н6М2Т	9,5	13,8	16,0	16,0	16,3	16,7	17,1	17,1	17,4	—	[5]
Х22Н9	—	—	—	17,5	—	—	—	18,5	—	—	[5]
20Х23Н18	14,9	15,7	16,6	17,3	17,5	17,85	17,85			—	[3, 37]
Х25Н13АТ, Х25Н13Т	—	—	—	—	17,1	—	—	—	18,1	—	[5]
12Х25Н16Г7АР	16,6	16,2	16,8	17,4	18,0	18,5	18,7	18,9	—	—	[37]

Хромоникелевые стали и сплавы с содержанием никеля более 20%

10Х11Н20Т3Р	15,9	16,4	17,2	17,9	18,4	18,9	19,2	8,15	(173—300 К)		[5, 51]
00Х18Н20С3М3Д3Б (α)	—0,25 (10 К)		0,61 (30 К)		5,95 (70 К)		14,3 (200 К)		15,8 (300 К)		[3]
3Х20Н20М4В4К45	—	—	11,8	12,4	12,7	13,0	13,5	14,0	14,4	15,0	[5]
Х20Н20Б1М3К20	—	—	—	15,7	16,1	16,65	17,2	17,6	17,8 (1223 К)		[5]
Х25Н20С2	16,1	—	—	—	—	17,8	17,8	18,1	18,5	18,8	[5]
Х26Н20Л	—	—	15,5	15,6	15,9	16,2	16,6	17,2	—	—	[5]
Х18Н22В2Т2 (α)	15,34	15,95	17,01	17,11	17,23	17,52	—	—	—	—	[5]
10Х11Н23Т3МР (α)	0,03 (5 К)		0,14 (30 К)		1,46 (50 К)		9,10 (100 К)		16,0 (300 К)		[46]
08Х15Н24В4ТР (α)	—0,12 (4 К)		—0,42 (30 К)		5,18 70 К)		8,48 (100 К)		15,6 (300 К)		[46]
Х15Н24В4Т	14,5	15,5	16,3	16,8	17,2	17,3	17,9	18,5	—	—	[5]
Х15Н24Т2 (α)	3,60 (70 К)		5,85 (100 К)		14,3 (200 К)		16,4 (300 К)		—	—	[3]
1Х16Н25М6	15,0	15,7	15,9	16,3	16,6	16,9	17,1	—	—	—	[5]
36Х18Н25С2	13,0	13,6	14,7	16,1	—	—	—	—	—	—	[5]
Х25Н25ТР	12,95	14,35	15,2	15,65	16,15	16,5	17,25	17,30	17,75	—	[5]
ХН30МБЮ (α)	—0,14 (4 К)		0,21 (10 К)		1,9 (50 К)		8,2 (100 К)		14,5 (293 К)		[51]
1Х15Н30Т2	—	—	—	16,1	16,7	16,9	17,5	—	—	—	[5]
ХН32Т	13,7	15,6	17,2	18,0	18,0	18,4	18,9	19,0	—	—	[37]
ХН35ВТ	14,8	15,1	15,5	15,9	16,1	16,6	16,9	17,7	—	—	[37]
ХН35ВТЮ	12,7	14,1	15,0	15,4	15,8	16,0	16,6	16,8	18,4	—	[5, 37]
Х15Н35В2М2ТР	13,0	—	—	15,0	16,0	16,2	16,85	16,9	—	—	[5]
Х15Н35В3ТК4	—	14,8	15,2	15,65	16,1	16,5	17,05	—	—	—	[5]
Х15Н35В5ТР	14,1	—	—	15,8	16,2	16,2	16,7	16,9	—	—	[5]
1Х16Н36МБТЮР	17,73	14,02 (373—473 К)			16,95 (673—773)			24,96 (973—1073 К)			[5]
Х26Н36К30МБ	—	—	13,5	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	16,0	—	[5]
Х16Н38В3Т	13,7	14,5	15,7	16,2	16,3	16,6	17,1	17,1	17,3	—	[5]
0Х17Н39Б	14,2	16,0	17,2	17,2	17,2	17,5	17,8	—	—	—	[5]
04ХН40МДТЮ	8,15	11,0	12,0	12,8	13,6	14,1	19,9	16,2	—	—	[51]
0Х21Н40БР	14,3	15,4	15,8	15,9	16,0	16,3	16,8	17,1	—	—	[5]
Х12Н42МБТ3	14,0	—	—	—	15,1	—	—	17,0 (300—1023 К)			[5]
ХН45Ю	15,8	15,9	15,95	16,55	—	16,6	—	19,0	19,7	—	[37]
Х15Н45К28М3Т2Ю3	12,3	—	—	—	14,3	—	—	—	17,0	—	[5]
Х22Н45М9	13,9	—	—	—	—	—	—	—	—	16,3	[5]
0Х20Н46Б	13,33	14,2	16,0	17,7	17,7	18,5	19,45	19,8	—	—	[5]
Х15Н51К20М5Ю5	11,9	—	—	—	14,3	—	—	—	17,7	—	[5]
Х11Н54К2М5ЮТ2	12,4	13,1	13,6	14,0	14,3	14,5	15,0	15,7	16,8	18,1	[5]
Х20Н54К16Т2Ю1	12,4	—	—	—	14,7	—	—	—	17,4	—	[5]
Х11Н55М5К20Т1	12,4	—	—	—	—	—	—	—	—	18,8	[5]
Х19Н55К10М10Т2Ю1	14,0	—	—	—	14,7	—	—	—	16,0	—	[5]

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	
ХН55ВМКЮ	11,8	12,2	12,7	13,1	13,4	13,6	14,1	14,8	15,7	17,0	[37]
ХН55ВМТКЮ	10,8	11,7	12,4	12,8	13,4	13,8	14,1	14,5	15,5	—	[37]
ХН55МБЮ	10,0 (20—300 К)			13,55 (200—300 К)			14,1 (260—300 К)			—	[51]
	—	—	14,1	14,3	14,5	15,1	15,5	16,3	16,3	—	[51]
ХН55МВЮ	13,4	14,2	14,9	15,2	15,8	16,2	—	17,3	18,8	—	[37]
ХН56МВТЮ	11,7	12,0	12,4	12,7	13,0	13,5	13,8	14,5	15,2	—	[37]
Х10Н56К20М5Т4Ю5	11,7	—	—	—	14,0	—	—	—	16,2	—	[5]
Х20Н56К18Т2Ю1,5	11,6	12,6	12,7	13,5	13,7	14,2	15,0	16,0	17,0	—	[5]
ХН57МВТЮ	12,6	13,6	14,7	15,0	15,3	15,8	16,2	17,3	18,2	—	[37]
Х16Н57М17В4	—	—	—	—	13,3	—	—	—	11,8	—	[5]
Х15Н58М16	11,3	—	—	—	—	—	—	—	—	15,3	[5]
Х20Н58М10К10	12,5	—	—	—	14,3	—	—	—	16,5	—	[5]
Х20Н59К16Т2Ю1	12,8	—	—	—	15,1	—	—	—	17,9	—	[5]
ХН60В	12,7	13,2	13,6	14,1	14,5	15,5	15,7	16,0	16,2	16,8	[37]
ХН60КМВЮБ	11,3	12,0	12,6	13,2	13,5	13,8	14,4	15,3	16,1	—	[37]
ХН60Ю	12,28	13,08	13,42	14,2	14,22	14,59	15,11	15,18	15,88	—	[37]
Х16Н60Ю3	12,3	13,1	13,4	14,2	14,40	14,6	15,1	15,2	15,9	—	[5]
ОХ20Н60Б	12,55	13,6	14,4	14,8	15,1	15,5	15,6	16,2	16,7	—	[5]
ХН62ВМКТЮБ	13,5	13,5	13,5	13,6	13,6	13,9	14,5	15,6	—	—	[37]
ХН62МБВЮ	12,0	12,8	13,3	13,5	13,8	14,5	14,8	15,5	16,4	17,3	[37]
ХН62МЮК10	11,49	12,57	13,03	13,37	13,68	13,98	14,33	14,75	15,56	16,9	[37]
ХН65ВМТЮ	11,5	—	12,3	12,75	13,0	13,2	14,0	14,3	15,0	—	[37]
ХН67ВМТЮ	12,0	12,3	13,5	13,6	14,4	14,8	15,2	16,2	—	—	[37]
Х18Н67В5М5Т2ЮР	10,4	11,1	11,7	12,0	12,5	12,8	13,6	13,8	14,9	—	[5]
ХН70ВМТЮ	12,0	12,5	13,5	13,9	14,3	14,8	15,8	16,3	16,7	—	[37]
ХН70ВМТЮФ	10,4	11,7	12,4	12,9	13,2	13,6	14,0	14,5	15,0	—	[37]
ХН70ВМЮ	10,2	11,3	12,0	12,2	12,4	12,6	13,1	13,2	14,0	15,1	[37]
ХН70ВМЮТ	12,2	12,65	13,2	13,6	14,1	14,55	15,1	15,8	—	—	[37]
Х15Н70В6М3Т2ЮР	12,4	12,8	13,05	13,3	13,6	14,0	14,6	15,25	16,1	17,35	[5]
Х15Н70В5М4Ю2ТР	12,2	12,6	13,2	13,6	14,1	14,5	15,1	15,8	16,5		[5]
Х27Н70Ю3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18	[5]
Х13Н71М5Б2Т1ЮБ	11,9	—	—	—	12,6	—	—	—	14,5	—	[5]
Х15Н73Т2Ю1Б	—	—	13,1	14,0	14,5	14,9	15,6	16,4	—	—	[5]
Х15Н73Т3Ю1Б1	13,7	13,9	14,2	14,4	14,6	15,0	15,4	16,2	16,8	—	[5]
Х20Н75ТЮ	12,2	13,0	13,4	13,8	14,1	14,7	15,4	15,5	16,0	—	[5]
ХН77ТЮР	12,67	12,9	13,3	13,8	14,2	14,6	15,1	15,5	16,2	16,8	[37]
Х20Н77Т2Ю	11,9	12,7	13,0	13,5	13,7	14,0	14,5	15,1	15,8	—	[5]
ХН78Т	12,2	13,0	13,4	13,8	14,1	14,7	15,4	15,5	—	—	[37]
Х16Н80ТБЮ	13,3	13,5	13,85	14,2	14,5	14,9	15,5	16,15	16,7	17,8	[5]
Х20Н80Т	11,8	12,9	12,9	14,4	14,8	15,8	16,1	16,50	16,8	—	[5]
Х20Н80Т3	11,9	12,7	13,0	13,5	13,7	14,0	14,5	15,1	15,8	—	[5]
Х20Н80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17,6	[5]
Х22Н47М9	13,8	—	—	—	14,9	—	—	—	16,8	—	[5]
Хромомолибденовые стали											
12ХМ, 12МХ	11,2	12,5	12,7	12,9	13,2	13,5	13,8	—	—	—	[5]
15ХМ	12,2	12,95	13,3	13,7	14,0	14,3	14,5	13,35	11,15	12,45	[5]
20ХМ	11,8	12,5	13,0	13,6	14,0	14,3	—	—	—	—	[5]
20ХМЛ	10,9	12,4	12,8	13,1	13,6	13,9	—	—	—	—	[5]
20ХМФЛ	10,0	11,9	12,9	13,1	13,5	13,8	—	—	—	—	[5]
30ХМ, 30ХМА	11,6	12,5	13,2	13,8	14,3	—	—	—	—	—	[5]
34ХМ, 35ХМ	12,3	12,6	13,3	13,9	14,3	14,6	—	—	—	—	[5]
35ХМФА	11,8	12,5	12,7	13,0	13,4	13,7	14,0	—	—	—	[5]
38ХМЮА	12,3	13,1	13,3	13,5	13,5	13,8	—	—	—	—	
12Х1МФ	12,4	13,0	13,6	14,0	14,4	14,7	14,9	14,8	12,0	—	[5]
15Х1М1Ф	11,2	11,7	12,5	13,0	13,5	13,7	—	—	—	—	[5, 37]
15Х1М1ФК1Р	12,1	12,5	13,1	13,8	14,6	14,9	14,6	—	—	—	[5]
20Х1М1Ф1ТР	—	12,0	12,3	12,85	13,0	13,55	—	—	—	—	[5]
20Х1М1Ф	12,05	12,4	12,85	13,15	13,45	13,8	13,9	14,25	12,65	—	[5]
25Х1МФ	11,3	11,7	12,8	13,2	14,2	14,4	—	—	—	—	[5]
25Х1М1Ф	10,9	12,0	12,7	13,65	13,7	13,8	14,0	—	—	—	[5]

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	
1Х2М	12,1	12,3	12,8	13,2	13,8	14,0	—	—	—	—	[5]
12Х2МБ, 1Х2МФБ	12,3	12,4	12,6	12,6	13,3	13,5	—	—	—	—	[5]
12Х2МФСР	11,85	12,9	13,55	13,95	14,35	14,8	15,15	15,5	12,4	—	[5]
15Х2М2ФБС	11,5	12,3	12,9	13,4	13,8	14,3	14,6	14,9	13,0	—	[5]
25Х2М1Ф	12,5	12,9	13,3	13,7	14,0	14,7	—	—	—	—	[5]
Х3МВФБ	10,6	11,45	12,3	12,65	13,1	13,35	13,4	13,1	11,45	10,35	[5]
Х5М	11,3	11,6	11,9	12,2	12,3	12,5	—	—	—	—	[5]
10Х7МВФБР	10,25	11,6	12,4	12,75	13,25	13,6	13,4	—	—	—	[37]
15Х11МФ	10,3	10,6	10,8	11,3	11,7	12,0	12,2	12,4	—	—	[37]
18Х11МФБ	10,3	10,6	10,8	11,3	11,7	11,8	12,0	12,4	—	—	[37]
12Х12МВФБР	11,15	11,13	11,42	11,8	12,0	12,15	12,15	12,65	11,6	—	[37]
12Х12МВФБ	10,25	11,6	11,6	11,6	13,85	12,7	14,95	10,5	13,85	—	[37]
12Х13М2С2	10,5	11,2	12,0	12,3	12,5	12,8	13,0	13,5	14,1	13,9	[5]
1Х13М2С1	10,2	10,8	11,3	11,7	12,0	12,4	12,6	13,0	13,0	13,6	[5]
1Х13М2ФБР	9,7	10,6	11,5	11,6	11,8	12,2	12,2	12,6	12,4	12,6	[5]
15М, 16М, 20М	12,0	12,6	13,2	13,7	14,2	14,7	—	—	—	—	[5]
Марганцевые и хромомарганцевые стали											
20Г (α)	0,3 (30 К)		5,80 (100 К)		10,0 (200 К)		11,9 (300 К)		—	—	[3]
22ГК	10,5	11,8	12,6	13,1	13,7	14,0	—	—	—	—	[5]
50Г	11,6	11,8	12,8	13,8	14,2	14,6	—	—	—	—	[5]
65Г	11,11	11,9	12,9	13,5	—	14,6	—	—	—	—	[5]
30Г2	11,9	12,7	13,4	13,9	14,3	14,7	15,1	13,6	13,7	14,5	[5]
14Г2АФ (α)	0,035 (4,3 К)		0,23 (20 К)		9,05 (100 К)		14,35 (200 К)		15,85 (300 К)		[46]
Г13	18,0	19,35	20,7	21,7	20,75	19,85	20,5	21,85	23,45	23,15	[5]
20ХГНР	—	11,7	12,7	13,5	14,0	14,3	15,2	—	—	—	[50]
25ХГСА	13,15	13,9	14,05	14,3	14,85	14,9	15,1	—	—	—	[5]
30ХГСА (α)	7,60 (50 К)		9,47 (100 К)								[5]
	12,0	12,5	12,9	13,2	13,6	13,9					[5]
Х12Г20Ф	15,4	16,9	17,5	18,2	18,9	19,7	20,5	—	—	—	[5]
03Х13АГ19 (α)	0,05 (10 К)		0,4 (40 К)		4,0 (100 К)		7,4 (200 К)		14,4 (300 К)		[5]
	13,85	16,80	18,70	19,40	20,40	21,80	21,8	22,5	—	—	[51]
07Х13АГ20Н4 (α)	—0,2 (20 К)		3,0 (77 К)		15,3 (293 К)		—	—	—	—	[5]
Х14Г14Н3Т	16,0	16,8	17,6	18,3	19,0	19,5	20,1	—	—	—	[5]
10Х14Г14Н4Т (α)	0,502 (20 К)		5,05 (100 К)		9,20 (200 К)		—	—	—	—	[37]
	15,3	15,8	18,9	19,05	19,07	20,02	20,07	21,1	—	—	[37]
Х15Г21Т	15,3	16,6	17,8	18,9	19,6	20,3	20,9	21,5	—	—	[5]
12Х17Г9АН4 (α)	3,60 (50 К)		9,05 (100 К)		14,1 (200 К)		14,6 (300 К)		—	—	[3]
07Х21Г7АН5 (α)	—0,03 (4 К)		—0,13 (20 К)		3,05 (70 К)		5,75 (100 К)		15,7 (300 К)		[3, 46]
Хромовольфрамовые стали											
28ХВФЦ	11,8	12,1	12,8	12,85	13,2	—	—	—	—	—	[5]
38ХВФЮА	12,25	12,9	13,1	13,35	13,75	14,1	14,45	14,1	11,6	—	[5]
3ХВ8Ф (α)	11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[5]
20Х3ВМФ	—	—	—	12,3	12,75	13,8	—	—	—	—	[5]
4Х4ВМФС (α)	11,44	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[5]
4Х4ВМФСЩ (α)	11,62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[5]
Х11В2НМФ	10,5	11,2	11,9	12,6	12,8	13,1	—	—	—	—	[5]
18Х12ВМБФР	11,5	11,13	11,42	11,8	12,0	12,5	12,65	11,6	—	—	[5]
15Х12ВНМФ	10,0	10,5	10,7	11,0	11,2	11,5	11,6	11,8	10,7	11,65	[5]
Х12В2МФ	10,8	—	—	—	—	13,5	—	—	—	—	[5]
Хромованадиевые стали											
15ХФ	11,9	12,4	13,1	13,7	14,2	14,5	14,9	—	—	—	[5]
40ХФА	11,0	—	12,9	—	—	14,5	—	—	—	—	[5]
50ХФА	11,8	12,4	13,1	13,6	13,9	14,1	—	—	—	—	[5]
12Х2ФБ	11,5	12,2	12,4	12,9	13,2	13,4	13,5	—	—	—	[5]
70Х4Ф1В18	11,25	11,7	12,0	12,2	12,4	12,6	12,8	12,9	11,35	12,45	[5]

Марка стали	Температура, К										Литература
	373	473	573	673	773	873	973	1073	1173	1273	
Хромокобальтовые стали и сплавы											
15К, 20К	—	12,0	12,8	13,2	13,5	13,85	—	—	—	—	[5]
22К, 25К (α)	—	12,2	13,0	13,3	13,9	—	—	—	—	—	[5]
ВЗК стеллит, наплавочный материал	—	—	—	—	—	14,0	—	—	—	16,0	[5]
03Х9К14Н6М3Д (α)	0,03 (4К)		—0,08 (9К)		0,3 (20 К)		4,4 (70 К)	7,4 (110К)		13,2 (300К)	[51,52]
40К19Х14Н20М4В4Б4	—	—	14,25	14,5	14,75	15,1	15,4	15,75	—	—	[5]
15К20Х20Н20М3В2Б	—	—	15,55	15,95	16,3	16,65	17,05	17,55	—	—	[5]
40К20Х20Н20М4В4Б4	—	—	15,15	15,25	15,35	15,45	15,7	16,1	16,65	—	[5]
40К30Х20Н20М8В4	—	—	13,7	14,2	14,65	15,05	15,45	15,95	16,55	—	[5]
75К41Х23Н20В12	—	—	14,2	14,3	14,55	14,85	15,25	15,9	—	—	[5]
40К44Х19Н10В15	—	—	14,5	14,65	14,85	15,25	15,7	16,25	16,9	—	[5]
40К44Х20Н20М4В4Б4	—	—	17,7	17,55	17,55	17,55	17,6	17,65	17,75	—	[5]
12К51Х20Н10В15	—	—	13,65	—	14,65	15,3	15,85	16,3	—	—	[5]
40К51Х24Н16М6	—	—	13,9	14,05	14,2	14,4	14,7	15,1	15,5	—	[5]
40К55Х25Н10В8	—	—	14,05	14,4	14,9	15,5	16,35	16,7	16,75	—	[5]
40К65Х23Н2В6	—	—	13,7	14,15	14,55	15,05	15,65	16,3	—	—	[5]
25К65Х25Н2М5	—	—	14,05	14,25	14,55	14,85	15,4	—	—	—	[5]
125К65Х27В4С3	—	—	14,5	14,65	14,85	15,25	15,7	16,25	—	—	[5]
Кремнистые стали											
30ХС, 37ХС, 40ХС	11,7	12,7	13,4	14,0	14,4	14,5	—	—	—	—	[5]
15ХСМБ	10,11	11,72	12,17	12,64	13,98	13,65	—	—	—	—	[5]
15ХСМФ	11,84	12,12	12,43	12,60	12,93	13,13	—	—	—	—	[5]
СХ6М	11,0	—	—	—	12,0	12,2	12,35	—	—	—	[5]
60С2А	12	12,8	—	13,5	13,4	—	—	—	—	—	[5]
50С2Г	11,2	12,2	12,9	13,4	13,7	14,1	14,4	13,6	13,7	14,5	[5]
Титановые и другие стали и сплавы											
48ТС-1, 48ТС-2, 48ТС-3	—	—	11,9—12,6 (300—573К)			—	—	—	—	—	[5]
15Х25Т	—	10,0	10,6	10,8	11,3	11,5	11,6	11,6	12,2	12,2	[37]
ХВГ	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0	14,5	—	—	—	—	[5]
Э (Армко)	—	11,7	12,99	13,71	14,15	—	—	—	—	—	[5]
Э1	10,8	12,6	13,8	14,6	14,8	14,3	14,3	—	—	—	[5]
Э5	10,6	11,8	13,0	14,0	14,7	15,3	15,6	—	—	—	[5]
Э14	—	11,7	12,7	13,7	14,7	15,6	15,4	—	—	—	[5]
Э16	7,0	10,7	13,1	14,3	14,6	14,3	13,2	—	—	—	[5]

Таблица 10.9. **Температурный коэффициент линейного расширения цветных металлов и сплавов**
Приведены значения истинного ТКЛР α (при данной температуре *T*) или среднего ТКЛР $\bar{\alpha}$ в интервале ΔT)

Вещество	*T*, Δ*T*, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^6 $К^{-1}$	Вещество	*T*, Δ*T*, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $К^{-1}$
Бронза [3, 5, 29, 46]					
Бр. А5	20	18,2	Бр. КН1-3	20	16,1
Бр. А7	20—300	17,8	Бр. Мг0,3	25—300	17,6
Бр. АМц 9-2	20	17,0	Бр. О10	20	18,5
Бр. АЖ 9-4	—200	10,5	Бр. ОС 8-12	20	17,1
	20	17,1	Бр. ОС 5-25	20	17,6
	20—300	19,0			

Вещество	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6}, K^{-1}	Вещество	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} K^{-1}
Бр. АЖМц 10-3-1,5	—200	11,9	Бр. ОФ 10-1	—200	12,5
	20	17,0		20	17
	20—400	20		400	22
Бр. АЖН 11-6-6	20	14,9			
Бр. АЖН 10-4-4	—200	11,4	Бр. ОФ 7-02	20	17,5
	20	17,0		400	19
Бр. Б2	—250	11,5	Бр. ОФ 6,5-0,4	20	17,1
	—100	15,6		20—300	19,1
	25	17,0	Бр. ОФ 4-0,25	20—100	17,6
	200—300	19,0		20—400	19,4
Бр. Кд1	20	17,6	Бр. ОЦ 10-2	0—100	18,3
Бр. КМц 3-1	—200	11,1	Бр. ОЦ 8-4	20	16,6
	20	18,5		20—180	18
	20—300	18	Бр. ОЦ 4-3	20	18
Бр. ОЦС 4-4-25	20	18,2	Бр. ОЦС 6-6-3	20	17,1
	20—500	19,0		300	18,2
Бр. ОЦСН 3-7-5-1	20	17,1	Бр. С30	20—260	18,4
Бр. Х0,8	—170	10,5	Сплав ХОТ	20—300	17
	20	16,7	Бр. Цр 0,4	20—100	16,32
Бр. Х0,5	—200	11,7		20—300	17,90
	20	17,6		20—600	19,80

Латунь [3, 5, 29, 46]

Л56	20—300	18,1	ЛАЖ 60-1-1	20	21,6
Л59	20	21	ЛАН 59-3-2	20	19
Л62	—200	14,1	ЛАНКМц 75-2-2,5-0,5-0,5	20	18,3
	20—100	19,0	ЛАЖМц 66-6-3-2	—	19,8
	20—300	20,6	ЛЖМц 59-1-1	—200	13,0
Л63	—200	14,1		20	22
	20	20,4	ЛК80	20	19,2
	20—300	20,6	ЛК80-3Л	—190	13,8
Л66	25—300	20,1		20	19,1
Л68	—250—20	13,5		20—300	17
	—100—20	17,2	ЛН 65-5	20	18,2
	20—100	18,5	ЛМц 58-2	20	21,2
	20—300	19,9	ЛО 90-1	20—100	18,4
Л70	20—300	19,9	ЛО 70-1	20	19,7
Л75	20—300	19,6		20—300	19,9
Л80	20	18,8	ЛО 62-1	20	19,3
	20—300	19,1	ЛС 74-3	20	17,5
Л85	20—100	17,7		20—300	19,8
	20—300	18,7	ЛС 64-2	20	20,3
Л90	20—100	14,4	ЛС 63-3	20	20,5
	20—300	18,2	ЛС 60-1	20—300	20,8
Л96	20	17	ЛС 59-1	—200	13,9
	20—300	18		—100	18,3
ЛА 85-0,5	20	18,6		20	20,6
ЛА 77-2	20—300	18,5			

Магниевые сплавы [47]

ВМ 65-1	20—100	20,9	МА5	20—100	26,1
	100—200	22,6		200—300	28,5
ВМ17	20—100	22,67	МА8	20—100	23,7
ВМД3	20—100	25,9		200—300	32,1
	200—300	30,6	МА9	20—100	25,5
МА1	20—100	23,1		200—300	32,3
	200—300	32,1	МА11	20—100	25,7
МА2	20—100	26,0		200—300	30,1
	200—300	29,5	МЛ2	20—100	26,6
МА3	20—100	26,0		200—300	27,7
	200—300	31,2			

Вещество	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $К^{-1}$	Вещество	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $К^{-1}$
МЛ4	20—100	26,4	МЛ10	20—100	27,4
	200—300	28,3		200—300	28,3
МЛ5	20—100	26,8	МЛ11	20—100	21,9
	200—300	28,7		200—300	24,8
МЛ6	20—100	26,1	МЛ12	20—100	26,2
	200—300	27,7		200—300	31,1
МЛ9	20—100	23,4	МЛ15	20—100	25,9
	200—300	32,7		200—300	27,9

Никелевые сплавы [3, 5, 29, 46]

МН16 (ТБ)	20	15,3		—173	6,52
МН19	20	16		—73	10,0
МН95-5	20	16,4		20	10,4
МНЖ 5-1	20	13,7	38НК	—100—20	4,30
МНМц 43-0,5, копель	20	14,0		—60—20	3,90
	20—600	16,8	34НК	—100—20	8,00
	20—1000	18,8	33НК	—100—20	8,60
МНМц 40-1,5	—	14,4		—70—20	10,0
МНМц 3-12	100	16	29НК	—100—20	6,30
МНЦ 15-20, нейзильбер	20—100	16,6		—70—20	6,50
НМц5	—	13,7	38НКД	—100—20	7,20
НМц2,5	—	13,4	32НКД, инвар	—60—20	0,90
НМцАК 2-2-1, алюмель	20	13,7	30НКД	—100—20	5,40
НМЖМц 30-1-1, мельхиор	25—300	16	37НКДП	20—100	10,9
НМЖМц 28-2,5-1,5, мо-	20—100	14,2		20—500	12,2
нель	25—300	14,9	40НКМП	20—100	11,0
	20—600	16,1		20—500	12,1
НХ9,5, хромель	0—1000	12,8	35НКТ, инвар	—100—20	2,3
НХ9, хромель А	20	12,8		—60—20	2,2
	0—1000	12,8	35НКХСП	20—100	10,8
Н65М28, хастеллой	20—300	11,1		20—500	11,8
	20—500	11,8	80НМ	20—100	12,2
	20—1000	15,2		20—500	14,5
Н64М28	20—100	10,0	79НМ	20—100	10,5
	20—1000	14,6		20—500	12,7
78Н	20—100	12,0	77НМД	20—100	12,7
50Н	20—100	8,9		20—500	14,9
	20—500	9,4	81НМТ	20—100	11,8
46Н	—100—20	7,7		20—500	13,5
45Н	20—100	8,2	65НП	20—100	11,8
	20—400	7,7		20—500	13,2
	20—500	9,0	36НХ, инвар	—269	—0,5
42Н	—100—20	4,9		—263	—1,3
36Н, инвар	—100—20	1,10		—253	—1,6
49НД, ковар	—100	10,6		—223	—0,2
	20	4,50		—173	1,9
47НД	—269	0,005		—73	1,9
	—263	0,02		20	1,9
	—253	0,12	76НХД	20—100	11,8
	—233	1,20		20—500	14,5

Легкоплавкие сплавы и припои [3, 48, 49]

ПМЦ36	—	22	99Pb1Sb	20	28,8
ПМЦ48, ПМЦ54	—	21	85Pb15Sb	20	24,8
50Pb50Sn	20	25,5			

Вещество	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $К^{-1}$	Вещество	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $К^{-1}$
Тугоплавкие сплавы [3, 5, 20, 57]					
ВТ2	20	8,72	ОТ4-1	25	8,0
ВР20	200	4	ТВ1	20	8,74
ВТ3	20	8,55	ТВ-10	20	6,34
ВТ3-1	20	8,52	40Nb60V	20	8,27
ВТ5	20—700	10,5	50Nb25V25Zr	20	7,85
ВТ5-1	20	9,15	WC + 5,9%Co	20—100	4,5
ВТ6	20	9,10		20—400	5,2
ВТ8	20	8,6	W + 0,015% Mo +	20—100	4,3
	20—300	9,8	+ 0,005% Cu +	20—500	4,6
	20—800	10,25	+ 0,002% As		
ВТ14	20	8,48	60W40Cu	20—100	8,0
ВТ15	20	8,30		20—700	10,2
			98,8Zr1,2Hf	20	6,28
Сплавы урана и плутония [3, 5]					
Сплавы U—Al			Сплавы U—Zr		
Al1	20	13,8	Zr5	20	14,5
Al2	20	14,1	Zr70	20	8,40
Сплавы U—Cr			Сплавы Pu—Al		
Cr5	20	14,5	98% Al	40—600	28,1
Cr50	20	10,4	90% Al	40—600	25,7
Cr70	20	8,52			

Таблица 10.10. Температурный коэффициент линейного расширения алюминиевых сплавов. Приведены значения истинного ТКЛР α (при данной температуре T) или среднего ТКЛР $\bar{\alpha}$ (в интервале ΔT)

Марка	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $К^{-1}$	Марка	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $К^{-1}$
А132	20—100	19,0		20—100	22,5
	20—200	20,0		20—200	23,4
	20—300	21,0		20—300	24,8
АВ	20—100	23,4	АЛ1	20—100	22,3
	20—200	24,5		20—200	23,2
	20—300	25,4		20—300	24,4
АД, АД1	—200	6,10	АЛ2	—200	7,20
	—100	18,6		—100	15,7
	20—100	23,5		20—100	21,1
	20—200	24,6		20—200	22,1
	20—300	25,6		20—300	23,3
АД33	—200—20	18,0	АЛ3	20—100	22,0
	—100—20	20,9		20—200	23,2
	20—100	23,2		20—300	24,0
	20—300	25,0	АЛ4	20—100	21,7
АК4	—173,2	16,4		20—200	22,5
	20—100	22		20—300	23,5
	20—200	23,1	АЛ5	20—100	23,1
	20—300	24		20—200	23,9
АК6	—200	7,60		20—300	25,2
	—100	16,0	АЛ6	20—100	21,5
	20—100	21,4		20—200	22,5
АК7	—200—20	16,6		20—300	23,5
	—100—20	19,3	АЛ7	20—100	23,0
АК8	—200	3,02		20—200	24,0
	—100	17,7		20—300	25,0

Марка	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $К^{-1}$	Марка	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $К^{-1}$
АЛ8	—173,2	18,3	В92	—200	16,5
	20—100	24,5		—100	21,4
	20—200	25,6	В93	20—100	24,1
	20—300	23,3	В94	20—100	21,9
АЛ9	—200	8,60	В95	—200	4,23
	—100	18,2		—100	18,4
	20—100	23,0		20—100	23,2
	20—200	24,0		20—200	24,3
	20—300	24,5		20—300	25,9
АЛ10В	20—100	22,3	В65	—193,2	19,9
	20—200	23,3		—100	22,3
	20—300	25,4	В14А	20—100	18,1
АЛ11	20—100	24,0	В300	20—100	22,9
	20—200	24,4		20—300	27,8
	20—300	26,6	Ви11-3	20—100	25,5
АЛ12	20—100	22,0		20—200	25,6
	20—200	23,0		20—300	27,3
	20—300	23,5	ВАД-1	—200	16,4
АЛ13	20—100	20,0		—100	19,3
	20—200	24,0	ВД17	—200	12,0
	20—300	27,0		—100	18,3
АЛ19	—173,2	16,4	Д1	—200—20	21,8
	20—100	19,5		—100—20	21,9
	20—200	21,9		20—100	22,9
	20—300	25,6		20—200	23,4
АЛ21	20—100	22,9		20—300	24,8
	20—200	24,6	Д16	—200	14,6
	20—300	27,8		—100	17,0
АЛ22	20—100	24,5		20—100	22,7
	20—200	25,6		20—200	23,4
	20—300	27,3		20—300	24,8
АЛ25	20—100	19,0	Д18, Д18П	—200	10,0
	20—200	20,0		—100	18,9
	20—300	21,0		20—100	22,7
АМг2	20—100	23,8		20—200	23,4
	20—200	24,5		20—300	24,8
	20—300	25,4	Д20	—200	7,10
АМг3	—193,2	9,2		—100	18,5
	—100	18,3	АМ8	20—100	22,8
	20—100	23,5	АЖ6	20—100	23,0
	20—300	25,5	АМК2	20—100	25,7
АМг4	—200	7,5	АСС-5	20—100	23,9
	—100	18,5	АСМ	20—100	24,0
АМг5	—200	4,82	АН-2,5	20—100	25,0
	—100	18,9	САС1	—223	6,05
	20—100	23,9		—73	11,8
	20—200	24,8		20	12,9
	20—300	25,9	Сплав 1915	—200	7,52
АМц	—193,2	6,05		—100	18,2
	—100	16,8		27	22,7
	20—100	24	Сплав 1201	—200	5,7
	20—200	24,8		—100	17,7
	20—300	25,9		7	22,1
АМцС	—200	7,01			
	—100	17,7			
	27	22,6			

Таблица 10.11. **Температурный коэффициент линейного расширения пластмасс. Приведены значения истинного ТКЛР α (при данной температуре T) или среднего ТКЛР $\bar{\alpha}$ (в интервале ΔT)**

Название	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-5} K^{-1}	Литература
Аман	—	1,0—2,0	[53]
Аминопласты	—	2,5—5,3	[53]
Анид	—	10	[29]
Анилиноформальдегидные полимеры	—	5—6	[29]
Бакелит	—200—20	4,5	[3]
	—70—20	6,7	[3]
	0	7,6	[3]
Волокнит	—	3—3,5	[29]
Дифлон	—	6	[53]
Капролон	—	6,6—9,8	[53]
Капрон А, Б, В	—	12—14	[29]
Капрон стеклонаполненный	—	10—12	[29]
Кремнийорганические полимеры	—	0,5—2,0	[29]
Лавсан	—	2,6—2,7	[29]
Меламинформальдегидные полимеры	—	4,0	[29]
Металлополимер для литьевых форм	27	3,0	[3]
Мочевиноформальдегидные полимеры	—	2,7	[29]
Нейлон	—263—20	4,3	[3]
	—233—20	4,6	[3]
	—173—20	5,2	[3]
	—73—20	5,4	[3]
	—7—20	4,0	[3]
Пенопласт ПВ	30	3,9	[56]
ПС	20	5,2—8,4	[56]
ПС-1	30	5,05	[56]
ПС-4	30	6,2	[56]
ПСБ	30	5,5	[56]
ПСВ	—	5,5—6,8	[56]
Пенопласт полиуретановый ПУ	20	5,0	[56]
ПУ-101	40	6,6	[56]
Пенопласт полихлорвиниловый ПХВ-1	30	4,6	[56]
Пенопласт	—	2,7—7,9	[55]
Пентон	—	7,8—8,0	[29]
Полиамид-6	—	8,2—9,7	[55]
-12	—	9,6—10	[53]
-66	—	9,9	[55]
-68	20	6,0	[3]
-68 с графитом	—	10—20	[29]
-68ВС	—	10—12	[29]
-68Т-40	—	4,5—4,8	[29]
-68Т-60	20	3—3,5	[29]
-548, -54	—	13	[29]
-Н, -С	—	12	[29]
-АК7	—	10—11	[29]
Полиарилат	—	6	[53]
Полибутилентерефталат	—	13	[54]
Поливинилбутил ПВБ	—	9,2	[29]
Поливинилбутилфталат ПВБФ	—	13	[29]
Поливинилбутилэфир	—180	9,0	[3]
	—80	13,0	[3]
	0—20	22,0	[3]

Продолжение табл. 10.11

Название	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-5} K^{-1}	Литература
Поливинилвторбутилэфир	—180	6,6	[3]
	—80	10,7	[3]
	20	21,4	[3]
Поливинилгексилэфир	—180	6,5	[3]
	—80	19,5	[3]
	—60	29,5	[3]
Поливинилдесилэфир	—180	8,2	[3]
	—80	15,8	[3]
	—	22,6	[3]
Поливинилиденфторид	—	8—12	[54]
Поливинилизобутилэфир	—180	7,0	[3]
	—80	11,4	[3]
	20	21,0	[3]
Поливинилизопропилэфир	—160	8,8	[3]
	—80	9,0	[3]
	20	22,1	[3]
Поливинилкарбазол	—	4,0	[29]
Поливинилметилэфир	—180	5,2	[3]
	—80	6,9	[3]
	20	22,4	[3]
Поливиниловый спирт	—	7—12	[29]
Поливинилоктилэфир	—180	7,1	[3]
	—80	12,5	[3]
Поливинилтолуол	—	7,5	[29]
Поливинилфталат	—	5,4	[29]
Поливинилфторид	—	5	[54]
Поливинилхлорид (винипласт)	—	6—9	[53]
листовой	—	6,7	[29]
ВМЛ-25	—50÷—10	2,8	[53]
	10—30	3,9	[53]
Поливинилэтилэфир	—180	8,1	[3]
	—80	9,5	[3]
	0	24,0	[3]
Полидиметилстирол	—	7,9	[29]
Полихлорстирол	—	7,0	[29]
Поликарбонат	—	6—7	[55]
Полиметилакрилат	—	8	[29]
Полиметилметакрилат:			
оргстекло ПА-200	—200	2,7	[3]
	—50	5,7	[3]
	0	7,7	[3]
	20	8,8	[3]
оргстекло СОЛ	20	7,1	[53]
	80	12,5	[53]
оргстекло СТ-1	20	7,7	[53]
	100	11,1	[53]
оргстекло 2-55	20	7,3	[53]
Полиметилсилоксан ПМС	—200	6,8	[3]
	—100	8,5	[3]
	20	10,0	[3]
Полиметилпентен	—	1,2	[55]
Полиметилфенилсилоксан ПМФС-1	—200	5,4	[3]
	—100	6,7	[3]
	20	10,0	[3]
Полиметилфенилсилоксан ПМФС-2	—200	7,2	[3]
	—100	8,5	[3]
	20	14,0	[3]
Полиоксиметилен	—	8,1	[29]
Полипропилен	0—100	11	[29]
стеклонаполненный	—	1,9	[29]

Продолжение табл. 10.11

Название	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $К^{-1}$	Литература
Полистирол блочный	—	6—8	[29]
МС	—	7—8	[29]
МСН	—	6—9	[54]
СА	—	7,4	[29]
САМП	—	7,5	[29]
СВ	—	8,5	[29]
светотехнический	—	6—7	[53]
Полистирол СН	—	8,6—9,5	[29]
ударопрочный СНП-2	—	8,6	[29]
ударопрочный ПС-СУ2	—	7,0	[29]
ударопрочный УП-1Э	—	7,0	[29]
Полистирольный пластик АСБ	—	8—10	[29]
Полисульфон	—	5,6	[55]
Политетрафторэтилен:			
Фторопласт-4(ρ = = 2,3 кг·м$^{-3}$)	—263—20	7,1	[3]
	—233—20	7,7	[3]
	—173	3,6	[3]
	0	11,5	[3]
Фторопласт-4, ГОСТ 10007—80	120—200	15	[48]
	210—280	21	[48]
Фторопласт-4М	—	9	[29]
Фторопласт-40	—	6,2—9	[29]
Фторопласт-42	—	9,7—26	[29]
Фторопласт-40П	0	11,3	[3]
Политрихлорфторэтилен (Фторопласт-3)	—263—20	3,96	[3]
	—233—20	4,26	[3]
	—173—20	4,74	[3]
	—73—20	5,29	[3]
	20	5,57	[3]
	120	10	[3]
Полиуретан ПУ-1	—	13,5	[29]
Полифенолоксид	—	1,6—3,4	[29]
Полифенилсилоксан ПФС	—200	4,5	[3]
	—100	5,7	[3]
	20	7,0	[3]
Полиформальдегид	—	7,9—8,1	[55]
Полихлорстирол	—	7,4	[29]
Полиэтилен:			
ВД	0—100	22—55	[29]
НД	0—100	11—50	[29]
Полиэтилен СД	—	10—55	[29]
Полиэтилен (усредненные для ПЭ различных плотностей)	—263—20	7,2	[29]
	—233—20	8,0	[29]
	—173—20	9,96	[29]
	—73—20	18,3	[29]
	20	34,0	[29]
Полиэтилен кабельный	—	20	[29]
Полиэтилен стеклонаполненный прессованный:			
10 % стекловолокна	20	7,0	[3]
20 % стекловолокна	20	5,2	[3]
40% стекловолокна	20	3,0	[3]
Полиэтилентерефталат	—100	5,0	[3]
	0	6,6	[3]
Премиксы	—	3,2—4,0	[53]
Пресс-материал ниплон	—	5,0	[53]
Пресс-материал фенилон	—	3,1—3,5	[53]
Пресс-материал на фенопластах	—	1—2,5	[53]
Стекловолокнит В, прессованный	25—200	1,24	[48]

Продолжение табл. 10.11

Название	T, ΔT, °С	α, $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $К^{-1}$	Литература
Стекловолокно	20—80	0,9—1,2	[53]
	80—160	0,4—0,8	[53]
Стеклолента:			
вдоль нитей	25—100	5,0	[48]
поперек нитей	25—100	8,5	[48]
Стеклопластики	—	0,5—1,2	[53]
Стеклотекстолит ВФТ-С	20—100	0,8	[48]
КАСТ-В	20—100	0,9	[48]
Текстолит листовой А-50	—233	0,55	[3]
	—173	1,25	[3]
	—73	1,8	[3]
	0	2,5	[3]
Фенолформальдегидные полимеры	—	2,5—6,0	[29]
Фенолформальдегидные полимеры ударопрочные	—	3,0—3,5	[53]
Фенолформальдегидный клей ВФТ-С	—210—20	3,98	[3]
	—173—20	4,35	[3]
	—73—20	5,21	[3]
	20	5,97	[3]
Шеллак	$<$46	9	[53]
	$>$46	4,4	[53]
Эпоксидные полимеры	—	5,5—6,5	[29]
диановые циклоалифатические	—	4,6—5,0	[29]
Эпоксидные смолы	—	3,5—4,0	[53]
Эпоксидный клей, К-9	—200—20	7,0	[3]
	—70—20	8,01	[3]
	—10—20	8,75	[3]
ЭПК-1	—200—20	5,16	[3]
	—170—20	5,64	[3]
	—70—20	7,05	[3]
	20	7,74	[3]
К-63А	—170	3,52	[3]
	—70	4,92	[3]
	20	6,0	[3]
Эпоксидный материал КЭП	20—150	2,6	[53]
	150—200	5,6	[53]
Эпоксититанкремний органический полимер с ситалловым наполнителем	—200—20	1,4—4,5	[3]
Этрол:			
ацетилцеллюлозный 2ДТ-43	—	10—12	[29]
нитроцеллюлозный	—	6,7	[29]
этилцеллюлозный	—	10—14	[29]

Таблица 10.12. Температурный коэффициент линейного расширения α, 10^{-6} $К^{-1}$, строительных материалов при 20 °С [3, 4, 16]

Вещество	α
Аглопорит:	
А-1	5,8
А-2	3,2
Аглопоритобетон	5,5
Асфальт	200
Бакелит	28
Бетон:	
тяжелый	10—14

Продолжение табл. 10.12

Вещество	λ
на граните	9,5
на базальте	8,6
на известняке	6,8
на керамзите	8,8—9,5
на шлаке	7,8—9,5
на перлите	9,5
на вермикулите	14,1
на диатомите	11,3
Битум БНД 90/130 (—30° С)	310
Бумага твердая	10
Газозолобетон	6,2—7,4
Глина	8,1
Гранит:	
серый среднезернистый	8,3
красный мелкозернистый	7,1
красный крупнозернистый	5,2
Диабаз:	
мелкозернистый	7,05
крупнозернистый	6,6
Доломит:	
С-1	9,3
С-2	4,8
С-21	3,4
Б-10	9,3
Б-12	9,1
Дерево:	
бук	2,57
дуб	4,92
сосна	5,41
ясень	9,5
Древеснослоистый пластик (ДСП)	3—30
Золобетон	9,1
Известняк:	
С-3	6,0
С-4	5,4
К-1	7,4
Я-7	6,5
Керамическая плитка облицованная	5,9
Керамзит:	
К-1	6,1
К-2	4,2
Керамзитобетон	5,5—6,9
Кирпичная кладка	4,0
Коксы:	
прокаленный КНПС	2,5—3
непрокаленный КНПС	15—19
полукокс КНПЛ-3	19
Мрамор	15
Пек:	
каменноугольный	36—45
нефтяной	45
Пемза:	
природная	5,6
шлаковая	8,1—9,7
Пеностекло	10,8
Песчаник:	
П-1	10,4
П-2	10,2
Перлит вспученный	5,6
Перлитобетон	6,8
Раствор:	
цементно-песчаный № 1, 2, 3	10,4
керамзитовый, состав по объему 1:2,5	8,1
перлитовый, состав по объему 1:2,5	9,0

Продолжение табл. 10.12

Вещество	λ
Раствор из портландцемента на песке, состав по массе:	
1:1	11—13,3
1:2	10,1
1:3	11,2
1:6	9,2—10,4
на кварцевом песке	9,5—11,2
на доломите	11,4
на известняке, состав по массе 1 : 2	9,5
Термозитобетон	9,15
Туфолава	7,6
Фибра	9,0
Шифер	20
Цементный камень глиноземистый	6,7
Эбонит вспученный	~60

10.3. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ОБЪЕМНОГО РАСШИРЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ (табл. 10.13)

Таблица 10.13. **Температурный коэффициент объемного расширения газов и жидкостей при нормальном давлении [16]. Приведены значения истинного коэффициента объемного расширения β (при данной температуре T) или среднего коэффициента объемного расширения $\bar{\beta}$ (в интервале ΔT) (ж — жидкость, г — газ)**

Вещество	Состояние	T, ΔT, К	β, $\bar{\beta}$, 10^{-3} K^{-1}
Элементы и неорганические соединения			
Азот	ж	68—89	5,88
	г	373	3,670
Алюминий	ж	935—1373	0,113
Аммиак	ж	223	1,93
	г	373	3,808
Аргон	ж	84—90	4,5
	г	373	3,676
Бром	ж	293	1,132
Висмут	ж	544—903	0,122
Вода (на линии насыщения)	ж	273	—0,064
	ж	283	0,070
	ж	293	0,182
	ж	323	0,449
	ж	373	0,752
Водород	ж	14—20.39	12,6
	г	373	3,659
Водород хлористый	г	273	3,769
Водород цианистый	ж	259	1,95
Галлий	ж	373	0,121
	ж	473	0,1143
	ж	673	0,1066
	ж	1173	0,0973
Гелий	ж	4,2	137
	г	373	3,658
Гелий-3	ж	3,2	580
Дициан	г	273	3,96
Иод	ж	380—423	0,80
Кадмий	ж	595—817	0,137
Калий	ж	373	0,280

Продолжение табл. 10.13

Вещество	Состояние	T, ΔT, К	β, $\bar{\beta}$, 10^{-3} K^{-1}
Кислород	ж	68—89	3,85
Кремний четыреххлористый	ж	293	1,430
Криптон	г	373	3,311
Литий	ж	458—508	0,174
Магний	ж	923—1073	0,380
Натрий	ж	373—453	0,275
	ж	373—973	0,390
Неон	г	373	3,659
Озон	ж	90	2,0
Олово	ж	505—673	0,106
	ж	505—1873	0,100
Ртуть [59]	ж	323,15	0,18190
	ж	373,15	0,18245
	ж	573,15	0,18677
	ж	1073	0,188
Рубидий	ж	313—413	0,339
Свинец	ж	601—1098	0,120
Сера	ж	388	0,430
	ж	425	0,490
	ж	438	0,170
	ж	483	0,344
	ж	630	0,388
Серебро	ж	1236—1373	0,111
Серная кислота	ж	293	0,576
Сероуглерод	ж	293	1,218
Серы двуокись	ж	223	1,70
Таллий	ж	573—626	0,150
Углерода двуокись	г	223—273	4,95
	г	273—373	3,723
Углерода оксид	ж	68—81	4,91
	г	273—373	3,669
Фосфор	ж	323—333	0,52
Фосфор трехбромистый	ж	293	0,868
Фосфор треххлористый	ж	293	1,154
Фосфора хлороокись	ж	293	1,116
Фтор	ж	55—85	3,0
Хлор	ж	172—239,4	1,41
Цезий	ж	303—325	0,341
Цинк	ж	693—816	0,147

Органические соединения

Азотноэтиловый эфир	ж	293	1,299
Аллил бромистый	ж	293	1,241
Аллил иодистый	ж	293	1,091
Аллил хлористый	ж	293	1,475
Аллиловый спирт	ж	293	1,049
Амил бромистый	ж	293	1,102
Амил иодистый	ж	293	0,986
Амил хлористый	ж	293	1,208
Амилацетат	ж	293	1,162
Амиловый спирт	ж	293	0,902
Анилин	ж	293	0,858
Ацетилен	г	273—373	3,739
Ацетонитрил	ж	293	1,301
Бензоил хлористый	ж	293	0,880
Бензойноамиловый эфир	ж	293	0,848
Бензойноэтиловый эфир	ж	293	0,900
Бензол	ж	293	1,237
Бутан	ж	253—303	2,0
Бутиловый спирт	ж	293	0,950

Продолжение табл. 10.13

Вещество	Состояние	T, ΔT, К	β, $\bar{\beta}$, 10^{-3} K^{-1}
Глицерин	ж	293	0,505
Диаллил	ж	293	1,357
Диаллиловый эфир	ж	293	1,346
Диизопропиловый эфир	ж	293	1,452
Диметилсульфид	ж	293	1,082
Дипропиловый эфир	ж	293	1,354
Диэтилкетон	ж	293	1,233
Диэтилоксалат	ж	293	1,136
Диэтилсульфид	ж	293	1,278
Изогексан	ж	293	1,445
Изомасляная кислота	ж	293	1,068
Изопентан	ж	293	1,680
Изопрен	ж	293	1,570
Изопропиловый спирт	ж	293	1,094
Капроновая кислота	ж	293	0,975
пара-Ксилол	ж	293	1,02
орто-Ксилол	ж	293	0,97
мета-Ксилол	ж	293	0,99
Масляная кислота	ж	293	1,063
Метилацетат	ж	293	1,427
Метил бромистый	ж	293	1,684
Метил иодистый	ж	293	1,273
Метиловый спирт	ж	293	1,199
Метилформиат	ж	293	1,563
Метилэтилкетон	ж	293	1,315
Муравьиная кислота	ж	293	1,025
Неопентан	ж	293	1,6
Олеиновая кислота	ж	293	0,721
Пентан	ж	293	1,605
Пропан	ж	205—243	1,9
Пропан бромистый	ж	293	1,447
Пропан иодистый	ж	293	1,102
Пропан хлористый	ж	293	1,591
Пропиловый спирт	ж	293	0,956
Пропионовая кислота	ж	293	1,102
Толуол	ж	323	1,138
Уксусная кислота	ж	293	1,071
Фенол	ж	293	1,090
Хлораль	ж	293	0,934
Хлороформ	ж	293	1,273
Этан	ж	143—200	2,4
Этилбензол	ж	293	0,961
Этил бромистый	ж	293	1,418
Этил иодистый	ж	293	1,179
Этил хлористый	ж	293	1,709
Этиленгликоль	ж	293	0,6375
Этиловый спирт	ж	293	1,120
Этиловый (диэтиловый) эфир	ж	293	1,656
Этилформиат	ж	293	1,417

Смеси

Бензин Б-70	ж	313	1,496
	ж	423	1,752
Воздух	г	273—373	3,670
Керосин Т-1	ж	293	0,955
Масло машинное МС-20	ж	303	0,638
Масло машинное МК-22	ж	323	0,886
Масло трансформаторное	ж	273	0,680
	ж	393	0,740
Петролейный эфир	ж	293	2,26

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Новикова С. И.** Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974.

2. **Свойства** элементов: Справочник. — 2-е изд./Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия. 1976.

3. **Новицкий Л. А., Кожевников И. Г.** Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. — 2-е изд. М.: Машиностроение. 1982.

4. **Новицкий Л. А., Кожевников И. Г.** Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение. 1975.

5. **Физические** свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник/Под ред. Б. Е. Неймарка. М.—Л.: Энергия, 1967.

6. **Petrenko N. S., Popov V. P., Puskarev E. A., Finkel V. A.**//Phys. Stat. Solidi (b). 1975. Vol. 68. № 2. P. K145—K160.

7. **Гешко Е. И., Михальченко В. П., Шарлай Б. М.**// Физика твердого тела. 1972. Т. 14. С. 1803—1804.

8. **Shouten D. R., Swenson C. A.**//Phys. Rev. B, Solid Stat. 1974. Vol. 10. № 6. P. 2175—2185.

9. **Свойства** и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов: Справочное пособие//Под ред. Р. А. Нилендера. М.: Энергия. 1973.

10. **Петренко Н. С., Попов В. П.**//Физ. низких температур. 1979. Т. 5. № 3. С. 301—304.

11. **Сирота Н. Н., Жабко Т. Е.**//Докл. АН СССР. 1977. Т. 236. № 5. С. 1120—1122.

12. **Grosse R. e. a.**//J. Phys. 1978. Vol. C11. № 1. P. 45—53.

13. **Handbook** of Optics/Ed. W. G. Driscoll. N. Y.—Toronto, 1978.

14. **White G. K.**/High Temp.—High Press. 1979. Vol. 11. № 4. P. 471—475.

15. **Финкель В. А., Смирнов Ю. И., Воробьев В. В.**// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 51. № 1. С. 32.

16. **Таблицы** физических величин: Справочник. — 1-е изд./Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат. 1976.

17. **Оптические** материалы для инфракрасной техники/Е. М. Воронкова, Б. И. Гречушников, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. М.: Наука. 1965.

18. **Bland J. A.**//Canad. J. Phys. 1959. Vol. 37. № 4. P. 417—421.

19. **Barnes J. O., Ragene J. A.**//Phys. Lett. 1974. Vol. 46A. № 5. P. 317—318.

20. **Рябцев Н. Г.** Материалы квантовой электроники. М.: Сов. радио. 1972.

21. **Материалы,** используемые в полупроводниковых приборах/Под ред. К. Хогарта: Пер. с англ. М.: Мир. 1968.

22. **Материалы** для оптоэлектроники: Сборник статей: Пер. с англ. М.: Мир. 1976.

23. **Rapp J. E., Merchaut H. D.**//J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. № 9. P. 3919—3923.

24. **Титанат** бария: Сборник статей/Под ред. Н. В. Белова. М.: Наука. 1973.

25. **Сирота Н. Н.**//Химическая связь в полупроводниках и термодинамика. Минск: Наука и техника. 1966.

26. **Бойко А. А., Головин В. А.**//Кристаллография. 1970. Т. 15. № 1. С. 186—189.

27. **Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю.** Теплофизические свойства неметаллических материалов (карбиды). М.: Энергия. 1977.

28. **Mazony Y., Perkins H. K.**//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. № 13. P. 5130—5131.

29. **Справочник** по электротехническим материалам.— 2-е изд./Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Л.: Энергия. 1976.

30. **Щелкотунов В. А., Даннлов В. И., Калачева В. С.**//Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1976. Т. 12. № 6. С. 1076—1080.

31. **Физнко-химические** свойства окислов: Справочник.— 2-е изд./Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия. 1978.

32. **Высокотемпературные** неорганические соединения. Киев: Наукова думка. 1965.

33. **Масленников С. Б.** Жаропрочные стали и сплавы: Справочник. М.: Металлургия. 1983.

34. **Самсонов Г. В., Виннцкий И. М.** Тугоплавкие соединения: Справочник. — 2-е изд. М.: Металлургия. 1976.

35. **Mizutani T. e. a.**//Jap. J. Appl. Phys. 1976. Vol. 15. № 7. P. 1305—1308.

36. **Кузьминов Ю. С.** Сегнетоэлектрические кристаллы для управлення лазерным нзлучением. М.: Наука. 1982.

37. **Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю.** Теплофизические свойства неметаллических материалов (окислы). Л.: Энергия. 1973.

38. **Журавлев Н. Н. и др.**//Кристаллография. 1961. Т. 6. № 5. С. 791—796.

39. **Антонова М. М.** Свойства гидридов металлов: Справочник. Киев: Наукова думка. 1975.

40. **Cook W. R., Berlincourt D. A., Scholz F. J.**//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. № 5. P. 1392.

41. **Материалы** для ядерных реакторов: Пер. с англ./ Под ред. Ю. Н. Сокурского. М.: Госатомиздат. 1963.

42. **Стекло:** Справочник/Под ред. Н. М. Павлушкина. М.: Стройиздат. 1973.

43. **Справочник** оптика-технолога/Под ред. С. И. Кузнецова, М. А. Окатова. Л.: Машиностроение, 1983.

44. **Справочнпк** конструктора оптико-механических приборов/Под ред. В. А. Панова. Л.: Машиностроение. 1980.

45. **Свойства** и разработка новых оптических стекол/ Под ред. Е. И. Царевского. Л.: Машиностроение. 1977.

46. **Солнцев Ю. Н., Степанов Г. А.** Материалы в криогенной технике. Справочник. Л.: Машиностроение, 1982.

47. **Смирягнн А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В.** Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник. — 3-е изд. М.: Металлургия. 1974.

48. **Анурьев В. И.** Справочник конструктора-машиностроителя. — 6-е изд. М.: Машиностроение, 1982. Т. 1—3.

49. **Артефьев Ю. М.**//Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов. 1980. Вып. 15. С. 115—123.

50. **Приданцев М. В., Давыдова Л. Н., Тамарина И. А.** Конструкционные стали: Справочник. М.: Металлургия. 1980.

51. **Ульянин Е. А., Сорокнна Н. А.** Стали и сплавы в криогенной технике: Справочник. М.: Металлургия. 1984.

52. **Техническая** энциклопедия. Справочнпк физических, химических и технологических величин. М.: ОГИЗ, 1930. Т. 1.

53. **Кацнельсон Н. Ю., Балаев Г. А.** Пластические массы. Свойства и применения: Справочник. — 3-е изд. Л.: Химия. 1978.

54. **Калинчев Э. Л., Саковцева М. Б.** Свойства и переработка термопластов: Справочное пособие. Л.: Химия. 1983.

55. **Термопласты** конструкционного назначения/Под ред. Е. Б. Тростянского. Л.: Химия. 1975.

56. **Романенков И. Г.** Физико-механические свойства пенистых пластмасс. М.: Изд-во стандартов. 1970.

57. **Теплофизические** свойства веществ при низких температурах. Материалы I Всесоюзного совещания, февр. 1971. М.: Изд. ВНИИФТРИ, 1972.

58. **Таблицы** стандартных справочных данных. ГСССД 56—83. М.: Изд-во стандартов, 1984.

59. **Таблицы** стандартных справочных данных. ГСССД 3—77. М.: Изд-во стандартов, 1978.

60. **Таблицы** стандартных справочных данных. ГСССД 59—83. М.: Изд-во стандартов. 1984.

61. **Таблицы** стандартных справочных данных. ГСССД 45—83. М.: Изд-во стандартов, 1984.

62. **Petukhov V. A., Chekhovskoi V. Ya., Andrianova V. G.**//High Temp.—High Press. 1979. Vol. 11. № 6. P. 625—627.

ГЛАВА 11

ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ

В. В. Игнатьев, В. А. Криворучко, А. И. Мигачев

11.1 ПАРЫ ВОДЫ

Таблица 11.1. **Давленне паров воды [1]**

t, °С	p, Па	t, °С	p, Па	t, °С	p, Па	t, °С	p, Па
0	$6{,}108\cdot10^{2}$	46	$1{,}0085\cdot10^{4}$	94	$8{,}1460\cdot10^{4}$	142	$3{,}8228\cdot10^{5}$
0,01	$6{,}112\cdot10^{2}$	48	$1{,}1161\cdot10^{4}$	96	$8{,}7685\cdot10^{4}$	144	$4{,}0418\cdot10^{5}$
2	$7{,}054\cdot10^{2}$	50	$1{,}2335\cdot10^{4}$	98	$9{,}4301\cdot10^{4}$	146	$4{,}2707\cdot10^{5}$
4	$8{,}129\cdot10^{2}$	52	$1{,}3612\cdot10^{4}$	100	$1{,}01325\cdot10^{5}$	148	$4{,}5099\cdot10^{5}$
6	$9{,}346\cdot10^{2}$	54	$1{,}5001\cdot10^{4}$	102	$1{,}0878\cdot10^{5}$	150	$4{,}7597\cdot10^{5}$
8	$1{,}0721\cdot10^{3}$	56	$1{,}6510\cdot10^{4}$	104	$1{,}1668\cdot10^{5}$	152	$5{,}0205\cdot10^{5}$
10	$1{,}2271\cdot10^{3}$	58	$1{,}8146\cdot10^{4}$	106	$1{,}2504\cdot10^{5}$	154	$5{,}2926\cdot10^{5}$
12	$1{,}4015\cdot10^{3}$	60	$1{,}9919\cdot10^{4}$	108	$1{,}3390\cdot10^{5}$	156	$5{,}5764\cdot10^{5}$
14	$1{,}5974\cdot10^{3}$	62	$2{,}1837\cdot10^{4}$	110	$1{,}4326\cdot10^{5}$	158	$5{,}8722\cdot10^{5}$
16	$1{,}8170\cdot10^{3}$	64	$2{,}3910\cdot10^{4}$	112	$1{,}5316\cdot10^{5}$	160	$6{,}1804\cdot10^{5}$
18	$2{,}0626\cdot10^{3}$	66	$2{,}6148\cdot10^{4}$	114	$1{,}6361\cdot10^{5}$	162	$6{,}5014\cdot10^{5}$
20	$2{,}3368\cdot10^{3}$	68	$2{,}8561\cdot10^{4}$	116	$1{,}7464\cdot10^{5}$	164	$6{,}8355\cdot10^{5}$
22	$2{,}6424\cdot10^{3}$	70	$3{,}1161\cdot10^{4}$	118	$1{,}8628\cdot10^{5}$	166	$7{,}1830\cdot10^{5}$
24	$2{,}9824\cdot10^{3}$	72	$3{,}3957\cdot10^{4}$	120	$1{,}9854\cdot10^{5}$	168	$7{,}5445\cdot10^{5}$
26	$3{,}3600\cdot10^{3}$	74	$3{,}6963\cdot10^{4}$	122	$2{,}1145\cdot10^{5}$	170	$7{,}9202\cdot10^{5}$
28	$3{,}7785\cdot10^{3}$	76	$4{,}0190\cdot10^{4}$	124	$2{,}2503\cdot10^{5}$	172	$8{,}3106\cdot10^{5}$
30	$4{,}2417\cdot10^{3}$	78	$4{,}3650\cdot10^{4}$	126	$2{,}3932\cdot10^{5}$	174	$8{,}7161\cdot10^{5}$
32	$4{,}7536\cdot10^{3}$	80	$4{,}7359\cdot10^{4}$	128	$2{,}5434\cdot10^{5}$	176	$9{,}1370\cdot10^{5}$
34	$5{,}3182\cdot10^{3}$	82	$5{,}1328\cdot10^{4}$	130	$2{,}7012\cdot10^{5}$	178	$9{,}5739\cdot10^{5}$
36	$5{,}9401\cdot10^{3}$	84	$5{,}5572\cdot10^{4}$	132	$2{,}8668\cdot10^{5}$	180	$1{,}0027\cdot10^{6}$
38	$6{,}6240\cdot10^{3}$	86	$6{,}0107\cdot10^{4}$	134	$3{,}0406\cdot10^{5}$	182	$1{,}0497\cdot10^{6}$
40	$7{,}3749\cdot10^{3}$	88	$6{,}4947\cdot10^{4}$	136	$3{,}2227\cdot10^{5}$	184	$1{,}0984\cdot10^{6}$
42	$8{,}1983\cdot10^{3}$	90	$7{,}0108\cdot10^{4}$	138	$3{,}4137\cdot10^{5}$	186	$1{,}1488\cdot10^{6}$
44	$9{,}0998\cdot10^{3}$	92	$7{,}5607\cdot10^{4}$	140	$3{,}6136\cdot10^{5}$	188	$1{,}2011\cdot10^{6}$

t, °C	p, Па	t, °C	p, Па	t, °C	p, Па	t, °C	p, Па
190	$1{,}2552\cdot10^6$	238	$3{,}2319\cdot10^6$	284	$6{,}8155\cdot10^6$	332	$1{,}3199\cdot10^7$
192	$1{,}3112\cdot10^6$	240	$3{,}3480\cdot10^6$	286	$7{,}0206\cdot10^6$	334	$1{,}3541\cdot10^7$
194	$1{,}3692\cdot10^6$	242	$3{,}4674\cdot10^6$	288	$7{,}2303\cdot10^6$	336	$1{,}3889\cdot10^7$
196	$1{,}4291\cdot10^6$	244	$3{,}5899\cdot10^6$	290	$7{,}4448\cdot10^6$	338	$1{,}4245\cdot10^7$
198	$1{,}4910\cdot10^6$	246	$3{,}7158\cdot10^6$	292	$7{,}6642\cdot10^6$	340	$1{,}4608\cdot10^7$
200	$1{,}5551\cdot10^6$	248	$3{,}8450\cdot10^6$	294	$7{,}8885\cdot10^6$	342	$1{,}4978\cdot10^7$
202	$1{,}6212\cdot10^6$	250	$3{,}9776\cdot10^6$	296	$8{,}1178\cdot10^6$	344	$1{,}5356\cdot10^7$
204	$1{,}6895\cdot10^6$	252	$4{,}1137\cdot10^6$	298	$8{,}3521\cdot10^6$	346	$1{,}5742\cdot10^7$
206	$1{,}7601\cdot10^6$	254	$4{,}2533\cdot10^6$	300	$8{,}5917\cdot10^6$	348	$1{,}6135\cdot10^7$
208	$1{,}8329\cdot10^6$	256	$4{,}3965\cdot10^6$	302	$8{,}8364\cdot10^6$	350	$1{,}6537\cdot10^7$
210	$1{,}9079\cdot10^6$	258	$4{,}5434\cdot10^6$	304	$9{,}0865\cdot10^6$	352	$1{,}6947\cdot10^7$
212	$1{,}9855\cdot10^6$	260	$4{,}6940\cdot10^6$	306	$9{,}3420\cdot10^6$	354	$1{,}7365\cdot10^7$
214	$2{,}0654\cdot10^6$	262	$4{,}8484\cdot10^6$	308	$9{,}6031\cdot10^6$	356	$1{,}7792\cdot10^7$
216	$2{,}1478\cdot10^6$	264	$5{,}0066\cdot10^6$	310	$9{,}8697\cdot10^6$	358	$1{,}8228\cdot10^7$
218	$2{,}2327\cdot10^6$	266	$5{,}1688\cdot10^6$	312	$1{,}0142\cdot10^7$	360	$1{,}8674\cdot10^7$
220	$2{,}3201\cdot10^6$	268	$5{,}3349\cdot10^6$	314	$1{,}0420\cdot10^7$	362	$1{,}9129\cdot10^7$
222	$2{,}4102\cdot10^6$	270	$5{,}5051\cdot10^6$	316	$1{,}0704\cdot10^7$	364	$1{,}9594\cdot10^7$
224	$2{,}5030\cdot10^6$	272	$5{,}6794\cdot10^6$	318	$1{,}0994\cdot10^7$	366	$2{,}0069\cdot10^7$
226	$2{,}5985\cdot10^6$	274	$5{,}8579\cdot10^6$	320	$1{,}1290\cdot10^7$	368	$2{,}0555\cdot10^7$
228	$2{,}6968\cdot10^6$	276	$6{,}0406\cdot10^6$	322	$1{,}1592\cdot10^7$	370	$2{,}1053\cdot10^7$
230	$2{,}7979\cdot10^6$	278	$6{,}2277\cdot10^6$	324	$1{,}1900\cdot10^7$	372	$2{,}1562\cdot10^7$
232	$2{,}9019\cdot10^6$	280	$6{,}4191\cdot10^6$	326	$1{,}2215\cdot10^7$	374	$2{,}2084\cdot10^7$
234	$3{,}0089\cdot10^6$	282	$6{,}6150\cdot10^6$	328	$1{,}2537\cdot10^7$	374,12	$2{,}2115\cdot10^7$
236	$3{,}1189\cdot10^6$			330	$1{,}2865\cdot10^7$		

11.2. ПАРЫ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Данные, приведенные в табл. 11.2—11.4, получены путем пересчета значений, выраженных в миллиметрах ртутного столба, в паскали. Пересчет производился на ЭВМ методом наименьших квадратов исходя из известного соотношения между давлением насыщенного пара и температурой $p=B-A/T$.

Давление пара нептуния получено расчетным путем из выражения

$$\lg p=5{,}1-2{,}06\cdot10^4(1/T),$$

приведенного в [2].

Таблица 11.2. **Температура насыщения неорганических веществ, К; $p = 10^{-8} \div 10^2$ Па [3]**

Вещество	Давление пара, Па										
	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^2
Азот	—	—	23,4	25,0	26,7	28,7	31,0	33,8	37,1	41,1	46,0
Алюминий	816,7	861,8	912,2	958,8	1033	1106	1190	1289	1405	1544	1713
Алюминий трехфтористый	—	—	—	—	—	—	—	966,2	1024	1090	1165
Алюминий фтористый	—	—	—	—	—	—	812,2	898,0	1004	1138	—
Америций [4, 5]	—	—	—	—	—	—	1066	1164	1283	1427	1609
Америций трехфтористый [6]	—	—	—	1083	1149	1225	1310	1409	1524	—	—

Вещество	Давление пара, Па										
	10^{-9}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^{2}
Аммиак	—	—	89,9	95,2	101,1	107,8	115,4	124,2	134,4	146,5	160,9
Аргон	—	—	26,5	28,3	30,3	32,7	35,5	38,7	42,6	47,4	53,5
Барий	492,6	521,6	554,1	591,0	633,1	681,7	738,4	805,3	885,6	983,7	1106
Барий фтористый [6]	—	—	—	—	1116	1187	1268	1361	1469	—	—
Бария оксид [7]	—	—	1153	1226	1309	1404	1514	—	—	—	—
Бериллий	864,4	911,4	963,8	1022	1089	1164	1251	1353	1471	1613	1785
Бериллий фтористый [3, 8, 9]	—	—	—	—	681,1	721,4	766,8	818,3	877,2	945,2	1024
Бериллий хлористый [10]	—	—	—	—	—	—	439,5	468,0	500,6	537,9	581,4
Бор	1456	1531	1614	1706	1810	1926	2059	2212	2389	2597	2845
Бора оксид [3, 11]	—	—	—	—	—	—	1234	1331	1445	1581	1744
Бром	—	—	127,4	134,5	142,5	151,4	161,6	173,2	186,6	202,2	220,7
Ванадий	1282	1348	1421	1502	1594	1697	1814	1949	2105	2289	2508
Висмут	460,7	485,3	512,7	543,4	578,0	617,3	662,4	714,5	775,5	848,0	935,3
Висмут треххлористый [12]	—	—	—	—	327,1	345,4	365,8	388,8	414,8	444,6	479,1
Вода	—	—	143,5	151,8	161,0	171,4	183,2	196,8	212,6	231,2	253,3
Водород	—	—	3,7	4,0	4,3	4,8	5,3	5,9	6,8	7,9	9,4
Водород бромистый	—	—	67,1	71,4	76,4	82,1	88,7	96,4	105,6	116,8	130,7
Водород фтористый	—	—	—	—	—	—	—	—	—	172,5	178,2
Водород хлористый	—	—	63,5	67,4	71,8	76,9	82,7	89,4	97,3	106,8	118,3
Вольфрам	2141	2249	2367	2500	2647	2814	3002	3218	3467	3759	4103
Вольфрама трехокись [13]	—	—	—	—	—	—	1252	1323	1401	1490	1590
Гадолиний	—	—	—	—	1338	1437	1550	1683	1842	2033	2268
Галлий	744,2	786,2	833,3	886,4	946,6	1015	1095	1189	1300	1434	1599
Галлий трехиодистый [14]	—	—	—	—	—	302,8	322,6	345,2	371,2	401,5	437,1
Галлия оксид [15]	—	—	—	—	—	—	—	1646	1752	1873	2012
Гафний	1675	1765	1865	1978	2104	2248	2414	2605	2829	3096	3418
Гелий	—	—	—	—	—	—	—	0,6	0,8	0,9	1,2
Германий	972,4	1025	1085	1152	1228	1314	1414	1530	1666	1830	2028
Германий селенистый [16]	—	—	—	—	—	—	—	677,8	730,4	792,0	864,8
Германий сернистый [3, 17]	—	—	—	—	—	—	572,1	609,6	652,3	701,5	758,7
Германий теллуристый [16, 18]	—	—	—	—	—	620,7	661,1	707,1	760,0	821,4	893,6
Гольмий	810,0	870,0	915,0	985,0	1040,0	1160,0	1225,0	1350,0	1480,0	1556,0	1720,0
Диспрозий [19]	—	—	—	—	1009	1082	1165	1263	1378	1517	1686
Европий	500,0	528,1	559,7	595,5	635,6	681,9	735,4	798,1	872,4	961,9	1072
Железо	1010	1063	1123	1189	1263	1347	1443	1554	1684	1837	2021
Железо бромистое [20, 21]	—	—	—	—	—	596,4	633,6	675,8	724,1	779,7	844,6
Железо иодистое [21]	—	—	—	—	—	—	614,3	653,3	697,6	748,3	807,0
Железо хлористое [21]	—	—	—	—	—	—	645,8	692,1	745,4	807,7	881,4
Золото	964,3	1017	1076	1143	1219	1305	1404	1520	1656	1819	2018
Индий	658,0	696,2	739,0	787,4	842,6	906,1	980,0	1067	1170	1297	1454
Индий трехбромистый [14]	—	—	—	—	—	400,5	424,0	450,4	480,3	514,5	553,9
Индий трехиодистый [14]	—	—	—	—	—	350,7	372,3	396,7	424,6	456,7	494,1
Индий треххлористый [14]	—	—	—	—	—	455,2	482,3	512,8	547,5	587,1	633,0
Индия оксид [22]	—	—	—	—	—	—	1504	1590	1686	1795	1919
Иод	160,0	168,0	176,9	186,9	198,0	210,5	224,6	240,9	259,6	281,6	307,5
Иридий	1556	1636	1724	1822	1932	2057	2198	2360	2548	2768	3030
Иттербий [19]	—	—	—	—	533,7	573,5	619,8	674,1	738,9	817,4	914,6
Иттрий [14, 23]	—	—	—	—	1375	1474	1590	1725	1885	2078	2314
Иттрий треххлористый [24]	—	—	—	—	—	—	—	751,3	821,4	906,0	1010
Кадмий	307,5	324,6	343,9	365,5	390,0	418,1	450,5	488,3	533,1	586,9	652,8
Кадмий бромистый [25]	—	—	—	—	—	—	486,0	528,6	579,5	641,1	717,5
Кадмий мышьяковистый	—	—	—	—	—	510,3	543,7	581,7	625,5	676,3	—
Кадмий селенистый	—	—	—	—	—	—	791,1	852,6	924,5	1009	—
Кадмий теллуристый	—	—	—	—	—	—	712,5	770,2	838,0	919,0	—
Кадмий хлористый	—	—	—	—	534,9	567,9	605,2	647,8	696,8	753,8	821,0
Калий	259,9	275,6	293,3	313,4	336,5	363,3	394,7	432,1	477,3	533,0	603,4
Калий фтористый [26]	—	—	—	—	738,7	785,9	839,6	901,2	972,5	1056	1155
Калий хлористый	—	—	—	—	—	723,7	774,7	833,3	901,7	982,2	1078
Кальций	486,2	514,0	545,2	580,5	620,6	666,7	720,2	783,0	857,8	948,4	1060

Вещество	Давление пара, Па										
	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^{2}
Кальций фтористый [27, 28]	—	—	—	1125	1193	1269	1356	1455	1571	1706	1866
Кальций хлористый [29, 30]	—	—	—	874,8	926,4	984,5	1050	1125	1212	1314	1434
Кислород	—	—	27,8	29,6	31,6	33,8	36,4	39,5	43,1	47,4	52,7
Кобальт	877,4	922,4	972,3	1027	1090	1160	1240	1332	1439	1564	1713
Кремний	961,8	1011	1066	1128	1197	1275	1365	1467	1586	1727	1894
Кремния оксид	—	—	—	—	—	1472	1615	1789	—	—	—
Криптон	—	—	36,5	38,9	41,7	45,0	48,8	53,3	58,7	65,3	73,6
Ксенон	—	—	50,3	53,7	57,6	62,1	67.3	73,5	81,0	90,1	101,6
Лантан	1152	1216	1288	1368	1459	1564	1684	1825	1991	2190	2433
Лантан треххлористый	—	—	—	803,0	847,4	897,1	953,0	1016	1088	1172	—
Литий	447,7	473,8	503,2	536,4	574,4	618,1	669,0	729,1	801,0	888,7	997,9
Литий фтористый [26, 31]	—	—	—	—	829,6	880,1	937,2	1002	1077	1163	1265
Литий хлористый [3, 31]	—	—	—	—	—	—	—	778,0	849,0	934,3	1038
Лютеций [19]	—	—	—	—	1412	1510	1623	1755	1909	2094	2318
Магний	404,1	426,8	452,1	480,6	513,0	550,0	592,8	642,8	702,0	773,3	860,6
Магний фтористый [6, 31]	—	—	—	—	—	1170	1245	1329	1425	1537	1667
Магний хлористый [31]	—	—	—	—	—	—	790,1	842,1	901,5	969,8	1049
Марганец	731,5	770,8	814,6	863,6	918,8	981,7	1053	1137	1235	1351	1491
Медь	889,1	937,8	992,1	1053	1122	1200	1291	1396	1520	1668	1849
Метан	—	—	31,7	33,9	36,5	39,4	42,9	47,1	52,1	58,3	66,3
Молибден	1664	1751	1848	1955	2076	2213	2370	2550	2759	3007	—
Молибдена триоксид [13]	—	—	—	—	—	—	798,8	837,3	879,6	926,4	978,5
Мышьяк	339,5	356,1	374,5	394,8	417,5	442,9	471,6	504,3	541,9	585,6	636,8
Натрий	306,0	324,2	344,7	367,9	394,5	425,2	461,2	503,7	554,9	617,7	696,5
Натрий бромистый [25]	—	—	—	—	—	—	740,8	802,1	874,5	961,2	1067
Натрий фтористый [26]	—	—	—	—	847,9	901,0	961,2	1030	1109	1202	1312
Неодим [19]	899,3	951,2	1009	1076	1150	1236	1336	1454	1595	1766	1978
Неон	—	—	7,3	7,8	8,4	9,1	9,9	10,9	12,1	13,6	15,5
Нептуний [32]	—	—	—	—	1548	1685	1849	2048	—	—	—
Никель	848,5	892,0	940,1	993,7	1053	1121	1198	1287	1389	1510	1653
Никель фтористый [33]	—	—	—	—	—	—	949,3	1023	1109	1212	1335
Ниобий	1802	1895	1997	2110	2238	2382	2545	2733	2951	3206	3510
Олово	850,0	898,9	953,7	1015	1086	1167	1261	1372	1504	1664	1862
Олово селенистое [34, 35]	—	—	—	—	—	—	725,5	783,2	850,9	931,3	1028
Олово теллуристое [34, 35]	—	—	—	—	—	—	757,5	815,1	882,1	961,2	1055
Осмий	1792	1882	1982	2094	2218	2359	2518	2700	2911	3158	3450
Палладий [36, 37]	991,8	1048	1111	1182	1262	1355	1462	1588	1738	1918	2140
Платина [3, 36]	1404	1478	1560	1650	1752	1867	1999	2150	2326	2534	2782
Плутоний [38]	—	—	—	—	—	1351	1463	1596	1755	1949	—
Плутоний трехфтористый [6]	—	—	—	—	—	1192	1269	1357	1458	—	—
Полоний	351,6	371,3	393,3	418,0	446,1	478,2	515,3	558,6	609,9	671,5	747,0
Празеодим [19]	—	—	—	—	1274	1371	1483	1616	1774	1967	2208
Радий	457,8	484,7	515,0	549,3	588,5	633,7	686,5	748,8	823,6	915,0	1029
Рений	1966	2070	2186	2317	2463	2630	2820	3041	3299	3604	3972
Родий	1383	1455	1535	1624	1724	1837	1966	2114	2287	2491	2734
Ртуть	181,9	192,1	203,5	216,3	230,9	247,5	266,7	289,2	315,8	347,8	387,0
Ртуть хлористая [39]	—	—	—	—	—	275,7	294,4	315,8	340,5	369,3	403,6
Рубидий	237,0	251,4	267,6	286,2	307,5	332,2	361,2	395,7	437,6	489,4	555,1
Рубидий фтористый [26]	—	—	—	—	693,9	738,2	788.6	846,3	913,1	991,4	1084
Рубидий хлористый	—	—	—	—	—	—	—	799,2	867,0	947,5	1044
Рутений	1646	1729	1820	1922	2036	2165	2311	2478	2670	2896	3163
Самарий	573,9	605,7	641,3	681,4	726,8	778,7	838,5	908,4	990,9	1089	1210
Самарий треххлористый [24]	—	—	—	—	—	—	—	751,7	814,9	889,7	979,7
Свинец	546,3	578,4	614,6	655,6	702,4	756,5	819,5	894,1	983,6	1092	1229
Свинец селенистый [40]	—	—	—	—	—	725,6	776,5	835,0	903,0	983,2	1078
Свинец теллуристый [41]	—	—	—	—	—	729,7	778,5	834,3	898,6	973,7	1062
Свинец фтористый	—	—	—	—	—	—	729,6	793,1	868,7	960,2	1073
Свинца оксид	—	—	—	—	—	—	885,0	945,2	1014	1094	1187

Вещество	Давление пара, Па										
	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^{2}
Селен	—	335,6	352,8	371,8	393,0	416,8	443,6	474,1	509,1	549,7	597,3
Сера	232,2	244,0	257,0	271,4	287,6	305,8	326,5	350,2	377,6	409,7	447,7
Серебро	752,5	793,8	840,0	891,8	950,4	1017	1094	1183	1289	1415	1569
Серебро бромистое [25]	—	—	—	—	—	—	1076	1149	1233	1329	1442
Серебро теллуристое [42]	—	—	—	—	—	—	1013	1073	1140	1216	1303
Сероводород	—	—	72,8	77,3	82,4	88,2	94,9	102,7	111,9	122,9	136,3
Скандий [19, 23, 43—45]	951,4	1004	1064	1130	1206	1293	1393	1511	1649	1816	2020
Стронций	453,3	479,2	508,2	540,9	578,2	620,9	670,5	728,7	797,9	881,6	985,0
Стронций фтористый [6]	—	—	—	1160	1225	1298	1381	1474	1581	—	—
Сурьма	486,0	511,8	540,4	572,3	608,4	649,2	695,9	749,9	812,9	887,5	977,2
Таллий	490,4	518,8	550,7	586,7	627,7	674,9	729,9	794,5	871,7	965,5	1081
Таллий селенистый [46]	—	—	—	—	459,3	489,4	523,8	563,3	609,3	—	—
Таллий сернистый [47]	—	—	—	—	—	—	390,8	428,1	473,2	529,0	—
Тантал	2003	2106	2221	2348	2492	2653	2838	3050	3296	3585	3929
Теллур	399,5	419,5	441,7	466,3	493,9	524,9	560,0	600,3	646,7	700,9	765,0
Теллура диоксид [48]	—	—	—	—	716,4	757,6	803,9	856,2	915,8	984,3	—
Тербий [19]	—	—	—	—	1295	1389	1498	1625	1776	1958	2181
Титан	1202	1264	1333	1409	1495	1591	1701	1828	1975	2147	2352
Титан сернистый [49]	—	—	—	—	—	1692	1811	1948	2108	2296	—
Торий	—	—	1693	1799	1919	2056	—	—	—	—	—
Торий четырехфтористый [50]	—	—	—	—	—	985,9	1047	1116	1195	1286	1392
Тулий	655,0	690,3	729,6	773,6	823,3	879,8	944,6	1019	1107	1212	—
Углерод (графит) [51]	—	1855	1953	2063	2185	2323	2480	2659	2867	3109	3396
Углерода диоксид	—	—	75,6	80,0	85,0	90,7	97,1	104,6	113,3	123,6	136,0
Углерода оксид	—	—	26,4	28,1	30,0	32,2	34,7	37,6	41,0	45,2	50,2
Уран	1252	1323	1401	1490	1591	1706	1839	1995	2180	2402	2675
Урана диоксид	—	—	1581	1669	1768	1879	2005	—	—	—	—
Уран четырехфтористый	—	—	—	—	—	—	—	—	1070	1148	1237
Уран черыреххлористый [52]	—	—	—	—	—	—	597,1	633,9	676,5	723,0	—
Фосфор белый	156,8	166,0	176,2	187,8	201,1	216,3	234,1	255,0	280,0	310,5	348,4
Фосфор красный	296,9	310,3	325,0	341,2	359,0	378,8	400,9	425,7	453,8	485,9	522,9
Франций	203.7	216,3	230,5	246,7	265,3	286,9	312,5	343,0	380,1	426,2	485,0
Фтор	—	—	—	—	—	—	—	—	—	42,4	49,4
Хлор	—	—	83,7	88,7	94,3	100,7	108,1	116,6	126,5	138,3	152,5
Хром	979,1	1030	1086	1149	1220	1301	1392	1498	1621	1765	1938
Хрома оксид	—	—	—	—	—	—	1716	1840	1985	2154	2354
Хром бромистый [53]	—	—	—	—	698,0	742,3	792,6	850,2	916,9	994,9	1087
Хром иодистый [54]	—	—	—	—	—	—	826,2	871,0	920,9	976,9	1040
Цезий	225,4	239,1	254,7	272,4	292,8	316,5	344,3	377,5	417,8	467,6	531,1
Цезий бромистый [55]	—	—	—	—	—	—	696,7	747,4	806,2	874,9	956,5
Цезий иодистый [55]	—	—	—	—	—	644,0	687,6	737,5	795,1	862,6	942,6
Цезий фтористый [26, 55]	—	—	—	—	610,7	649,9	694,4	745,6	804,8	874,3	957,0
Цезий хлористый [55, 56]	—	—	—	581,0	617,3	658,3	705,2	759,2	822,3	896,3	986,1
Церий	—	—	—	—	1306	1391	1487	1598	1727	1879	2059
Цинк	354,9	374,6	396,6	421,3	449,4	481,4	518,3	561,4	612,3	673,3	747,9
Цинк бромистый [25]	—	—	—	—	394,9	421,9	452,9	488,7	530,7	580,6	640,8
Цинк мышьяковистый [59]	—	—	—	—	517,9	555,1	598,2	648,5	—	—	—
Цинк селенистый	—	—	—	—	—	—	911,6	974,1	1045	1128	—
Цинк сернистый	—	—	—	—	—	—	—	—	1127	1252	1408
Цинк теллуристый	—	—	—	—	—	—	778,2	839,6	911,4	996,6	—
Цирконий	1565	1648	1741	1846	1963	2096	2249	2426	2633	2878	3174
Эрбий [19]	—	—	—	—	1128	1207	1298	1403	1527	1674	1854

Таблица 11.3. **Температура насыщения неорганических веществ, К; $p = 0{,}1 \div 100$ кПа [3]**

В таблице приведены значения температуры, К, при которых устанавливается указанное давление пара

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Азот	46,0	47,9	50,7	53,0	55,5	59,3	62,5	66,1	71,5	76,2
Азота закись	127,9	132,0	137,7	142,4	147,4	154,6	160,5	166,9	176,1	183,9
Азота оксид	85,6	88,2	91,7	94,6	97,7	102,1	105,7	109,6	115,2	119,8
Азота фтороксид	127,0	131,9	138,8	144,6	150,8	160,0	167,7	176,2	188,9	199,7
Азота тетраоксид	213,1	218,9	227,0	233,5	240,4	240,2	258,1	266,6	278,7	288,6
Азотный ангидрид	234,0	239,6	247,5	253,8	260,5	269,8	277,3	285,3	296,5	305,6
Азот трехфтористый [3, 60]	87,3	90,8	96,0	100,4	105,2	112,2	118,2	124,8	134,8	143,6
Алюминий	1719	1780	1868	1941	2019	2133	2228	2332	2486	2616
Алюминий-боргидрид	—	205,4	216,7	226,1	236,4	251,5	264,2	278,3	299,5	317,8
Алюминий бромистый	343,3	355,5	372,9	387,3	402,8	425,3	444,1	464,6	494,9	520,5
Алюминий иодистый	439,7	454,5	475,7	493,0	511,7	538,7	561,1	585,4	621,0	650,9
Алюминий однофтористый [61]	1253	1266	1283	1297	1310	1329	1343	1357	—	—
Алюминий фтористый	1496	1521	1557	1585	1614	1654	1685	1718	1763	1799
Алюминий хлористый	369,8	376,8	386,4	394,0	401,9	412,9	421,6	430,6	443,3	453,3
Алюминия оксид	2394	2459	2551	2624	2702	2813	2903	2998	3135	3247
Америций [4]	1649	1718	1820	—	—	—	—	—	—	—
Аммиак	159,7	165,1	172,7	178,9	185,7	195,4	203,4	212,2	224,9	235,7
Аммоний бромистый	465,2	479,9	500,8	517,9	536,1	562,3	583,9	607,2	641,1	669,3
Аммоний иодистый	473,4	488,4	509,8	527,2	545,9	572,8	594,9	618,8	653,6	682,5
Аммоний кислый сернистый	218,8	225,2	234,2	241,6	249,4	260,5	269,7	279,4	293,5	305,1
Аммоний хлористый	428,4	441,8	460,7	476,1	492,6	516,2	535,7	556,6	587,0	612,3
Аммоний цианистый	219,4	225,6	234,5	241,7	249,4	260,3	269,1	278,7	292,3	303,6
Аммония азид	299,3	307,4	318,9	328,2	338,1	352,0	363,4	375,5	392,8	407,0
Аммония карбамат	243,9	250,5	259,8	267,4	275,4	286,7	295,9	305,7	319,7	331,2
Аргон	53,2	55,3	58,4	61,1	63,9	68,1	71,7	75,7	81,7	86,9
Арсин [62]	143,3	150,4	160,9	169,9	180,0	195,3	208,7	224,1	248,2	270,3
Астат	427,7	441,0	459,7	475,0	491,4	514,8	534,1	554,9	584,9	609,9
Барий	1113	1161	1232	1291	1357	1455	1538	1632	1775	1902
Барий хлористый [63]	1533	1590	1672	1740	—	—	—	—	—	—
Бериллий	1793	1857	1949	2025	2108	2228	2328	2438	2599	2737
Бериллий-боргидрид	272,3	279,4	289,4	297,4	305,8	317,8	327,4	337,7	352,7	364,3
Бериллий бромистый	556,5	571,0	591,5	608,1	625,5	650,2	670,2	691,5	721,8	746,5
Бериллий иодистый	550,3	566,0	588,2	606,1	625,2	652,3	674,5	698,2	732,2	760,3
Бериллий фтористый [8, 9]	1022	1052	1094	1128	1164	1216	1258	—	—	—
Бериллий хлористый	557,6	572,8	594,1	611,4	629,7	655,6	676,7	699,1	731,3	757,6
Бор	2859	2950	3079	3185	3299	3461	3596	3741	3952	4128
Бор трехиодистый [64]	301,4	313,1	329,9	343,9	359,1	381,4	400,2	421,0	452,0	478,6
Бор трехфтористый	116,3	120,2	125,7	130,3	135,2	142,2	148,0	154,3	163,6	171,4
Бор треххлористый	177,8	184,7	194,7	203,0	212,0	225,3	236,5	248,9	267,4	283,3
Бром	216,5	224,1	234,9	243,8	253,4	267,4	279,0	291,7	310,3	326,1
Бромдихлорфторсилан	182,2	189,9	201,1	210,5	220,8	236,1	249,1	263,7	285,8	305,2
Бром пятифтористый [65]	197,8	205,4	216,4	225,5	235,4	250,0	262,2	275,7	295,8	313,1
Бромсилан	—	173,8	183,7	192,1	201,2	214,7	226,1	238,8	258,1	274,8
Ванадий	2519	2600	2716	2810	2912	3057	3177	3308	3497	3655
Ванадия окситрифторид [66]	—	—	—	—	—	—	336,4	349,6	368,7	384,6
Ванадия окситрихлорид [3, 67]	244,7	254,6	268,9	280,8	293,9	313,2	329,5	347,6	374,9	398,6
Висмут	1030	1072	1134	1185	1241	1324	1395	1473	1592	1695
Висмут пятифтористый	343,4	354,7	370,8	383,9	398,1	418,5	435,4	453,7	480,4	502,7
Висмут трехбромистый	—	501,3	525,6	545,6	567,2	598,5	624,5	653,0	694,8	730,2
Висмут трехиодистый	519,6	539,2	567,4	590,8	616,3	653,5	684,7	719,1	770,3	814,1
Висмут хреххлористый	—	484,4	508,3	528,0	549,4	580,3	606,2	634,5	676,2	711,5
Вода	250,8	259,2	271,2	281,1	291,7	307,1	319,8	333,7	353,9	370,9
Вода (дейтериевая)	—	—	271,7	281,8	292,7	308,4	321,5	335,7	356,5	374,1
Вода (дейтероводородная)	—	—	270,8	280,8	291,7	307,4	320,4	334,6	355,4	373,0
Вода (тяжелокислородная)	—	—	269,7	279,8	290,7	306,4	319,5	333,8	354,7	372,4
Водород	9,3	9,9	10,7	11,4	12,2	13,4	14,6	15,9	18,1	20,2

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Водород (дейтерий)	11,9	12,5	13,4	14,2	15,1	16,5	17,7	19,1	21,3	23,4
Водород (дейтероводород)	10,7	11,3	12,2	12,9	13,8	15,1	16,3	17,6	19,9	22,0
Водород (тритий)	13,3	14,0	15,0	15,8	16,8	18,3	19,6	21,1	23,5	25,7
Водорода перекись	282,9	292,8	307,1	318,9	331,6	350,1	365,5	382,3	407,1	428,0
Водород бромистый	131,4	136,3	143,4	149,2	155,6	164,8	172,6	181,1	193,8	204,6
Водород двухсернистый	226,5	234,2	245,2	254,3	264,0	278,1	289,8	302,6	321,2	336,9
Водород иодистый	146,7	152,6	161,0	168,1	175,8	187,2	196,8	207,4	223,4	237,2
Водород мышьяковистый	127,2	132,4	139,9	146,2	153,1	163,3	171,9	181,5	196,0	208,6
Водород селенистый	154,0	159,2	166,6	172,7	179,2	188,6	196,5	205,0	217,4	227,9
Водород теллуристый	171,9	178,2	187,4	194,9	203,1	215,1	225,1	236,1	252,5	266,4
Водород фтористый	175,4	182,7	193,4	202,3	212,2	226,7	239,1	252,9	273,9	292,2
Водород хлористый	119,3	123,8	130,2	135,5	141,3	149,7	156,8	164,5	176,1	185,9
Вольфрам	4098	4214	4377	4510	4650	4850	5013	5188	5438	5643
Вольфрам окситетрахлорид [68]	374,2	383,6	396,7	407,2	418,3	434,0	446,6	460,0	478,9	494,4
Вольфрам пятибромистый [69]	436,2	451,4	473,2	491,2	510,5	538,6	562,0	587,5	624,9	656,6
Вольфрам пятихлористый [70]	—	406,0	423,0	436,9	451,6	472,8	490,1	508,8	535,7	558,1
Вольфрам шестифтористый	198,2	204,5	213,5	220,9	228,8	240,1	249,4	259,5	274,2	286,5
Вольфрам шестихлористый [68]	414,6	428,1	447,5	463,4	480,4	504,9	525,2	547,2	579,2	606,0
Гадолиний	2280	2420	2634	2823	3041	3386	3704	4088	4738	5385
Галлий	1596	1656	1743	1815	1894	2009	2105	2211	2369	2504
Галлий треххлористый	309,8	320,6	336,1	348,8	362,6	382,5	399,1	417,3	443,9	466,4
Гафний	3370	3518	3734	3916	4117	4416	4673	4961	5403	5792
Гафний четыреххлористый [3, 71, 72]	441,0	452,5	468,6	481,6	495,4	514,7	530,5	547,1	570,9	590,3
Гексаборан [73]	234,9	243,3	255,2	265,1	275,8	291,3	304,2	318,4	339,2	356,9
Гексафторидсилан	190,2	195,1	202,1	207,6	213,5	221,9	228,6	235,8	246,0	254,3
Гексахлоридсилан	272,9	282,4	296,1	307,4	319,6	337,3	352,0	368,0	391,7	411,7
Гексахлордисилоксан	267,0	276,3	289,6	300,6	312,4	329,6	343,9	359,4	382,3	401,7
Гелий	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,1	2,4	2,8	3,6	4,6
Германий	2044	2117	2222	2309	2403	2540	2654	2778	2963	3119
Германий бромистый	—	293,2	309,7	323,4	338,5	360,6	379,4	400,2	431,6	458,8
Германий хлористый	222,9	231,5	243,9	254,2	265,4	281,8	295,6	310,8	333,6	353,2
Германия гидрид	108,2	112,8	119,6	125,4	131,7	141,0	149,1	158,0	171,7	183,8
Гидроксиламин	—	298,8	308,8	316,8	325,2	337,1	346,6	356,8	371,1	382,7
Дейтероаммиак	—	—	—	—	—	192,9	201,9	211,9	226,7	239,3
Дейтеродиборан [74]	109,0	113,5	119,9	125,3	131,1	139,8	147,1	155,3	167,6	178,3
Диборан [3, 74, 75, 76]	109,2	113,7	120,3	125,7	131,7	140,5	148,1	156,4	169,0	180,0
Дибромдифторсилан	—	—	193,4	201,9	211,2	224,9	236,6	249,5	268,8	285,6
Дибромсилан	208,1	216,6	229,0	239,3	250,7	267,4	281,6	297,4	321,2	342,0
Дибромхлорфторсилан	203,6	211,8	223,7	233,7	244,5	260,6	274,2	289,2	312,0	331,6
Дигерман	180,8	188,5	199,6	208,9	219,2	234,4	247,4	261,9	283,9	303,2
Дигидродекаборан	324,1	334,4	349,0	360,9	373,7	392,1	407,2	423,5	—	—
Дигидропентаборан	—	217,1	228,7	238,3	248,7	264,1	277,0	291,2	312,5	330,7
Дииодсилан	—	256,4	272,4	285,8	300,7	323,0	342,2	363,7	396,8	426,1
Дисилазан	200,4	208,2	219,5	228,9	239,2	254,2	266,9	280,9	301,9	319,9
Дисилан	154,9	161,4	170,8	178,6	187,3	200,1	211,0	223,1	241,5	257,6
Дисилоксан	158,1	164,5	173,7	181,4	189,9	202,3	212,8	224,4	242,0	257,2
Диспрозий [77]	1750	1810	2000	2060	2140	2300	2430	2590	2720	2880
Дифторсилан	123,6	128,3	135,0	140,6	146,7	155,6	163,0	171,3	183,5	193,9
Дихлордифторсилан	145,3	151,3	160,2	167,5	175,6	187,6	197,8	209,2	226,4	241,5
Европий	1074	1116	1178	1230	1286	1369	1440	1517	1634	1735
Европий хлористый [78]	1549	1608	1694	1765	1843	1957	2052	2158	2316	2451
Железа карбонил	—	248,8	262,0	273,0	284,9	302,4	317,0	333,2	357,4	378,1
Железо	2031	2101	2201	2283	2371	2499	2605	2721	2891	3034
Железо бромистое [79]	825,2	853,0	892,8	925,5	960,6	1011	1053	1099	1166	1222
Железо хлористое	—	—	917,1	953,3	992,5	1049	1097	1149	1226	1292
Железо хлорное	465,5	475,5	489,4	500,5	512,1	528,3	541,2	554,7	573,7	589,0
Золото	2025	2099	2204	2291	2385	2522	2636	2762	2947	3105
Индий	1452	1508	1589	1656	1730	1837	1928	2029	2178	2307

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Индий хлористый [80]	602,4	623,6	654,1	679,3	706,4	—	—	—	—	—
Индия сульфид [81]	1265	1303	1358	1402	1449	1517	1572	1631	—	—
Иод	304,7	314,8	329,3	341,1	353,9	372,3	387,5	404,0	428,1	448,4
Иод пятифтористый	245,8	254,5	267,0	277,3	288,5	304,6	318,1	332,9	354,7	373,1
Иодсилан	—	204,4	215.8	225.2	235,5	250,7	263,5	277,7	299,0	317,4
Иридий	3033	3133	3274	3390	3514	3693	3841	4001	4235	4431
Иттербий	912,7	945,9	993,8	1033	1076	1138	1190	1248	1332	1405
Иттербий хлористый [78]	1510	1571	1659	1733	1814	1932	2033	2145	2313	2459
Иттрий	2362	2443	2560	2657	2760	2910	3035	3172	3371	3540
Кадмий	655,9	681,0	717,3	747,4	780,2	828,2	868,6	913,1	979,6	1036
Кадмий бромистый [82]	727,9	756,9	799,0	834,0	872,2	928,5	—	—	—	—
Кадмий иодистый	678,1	703,8	741,0	771,8	805,3	854,4	895,6	941,0	1008	1066
Кадмий фтористый	1636	1683	1750	1805	1863	1945	2012	2084	2188	2274
Кадмий хлористый [3, 83]	804,9	834,0	875,9	910,6	948,0	1002	1048	1098	1172	1234
Кадмия диметил [84, 85]	242,9	251,8	264,6	275,2	286,6	303,3	317,2	332,5	355,2	374,5
Кадмия оксид	1255	1295	1354	1401	1452	1526	1587	1653	1749	1829
Калий	606,6	633,1	672,0	704,7	740,8	794,5	840,7	892,5	971,7	1041
Калий бромистый	1046	1086	1143	1191	1243	1319	1383	1454	1559	1649
Калий едкий	972,1	1011	1068	1116	1168	1246	1311	1384	1493	1589
Калий иодистый	999,5	1038	1094	1140	1190	1265	1327	1396	1499	1588
Калий фтористый	1138	1180	1241	1291	1345	1425	1491	1564	1673	1766
Калий хлористый	1075	1115	1172	1220	1272	1348	1411	1481	1584	1673
Кальций	1060	1104	1168	1221	1280	1366	1440	1522	1646	1754
Кальций хлористый [63]	1467	1516	1586	1643	—	—	—	—	—	—
Карбонилборин	131,2	136,3	143,6	149,7	156,4	166,1	174,3	183,3	196,8	208,5
Карбонилхлорид (фосген)	176,3	183,1	192,8	200,9	209,8	222,7	233,5	245,5	263,4	278,8
Кислород	53,0	55,3	58,6	61,3	64,4	68,9	72,8	77,1	83,7	89,5
Кобальт	1717	1774	1855	1921	1992	2095	2180	2272	2406	2519
Кобальта нитрозилтрикарбонил	—	—	—	255,7	266,7	282,8	296,4	311,3	333,4	352,4
Кобальт хлористый	—	—	—	—	974,4	1038	1091	1151	1241	1319
Кремний	1908	1975	2071	2151	2236	2361	2465	2578	2745	2886
Кремний четырехиодистый [64]	357,4	371,3	391,4	408,2	426,4	453,1	475,7	500,6	537,9	570,0
Кремний четырехфтористый	127,5	131,2	136,6	140,9	145,5	152,1	157,4	163,2	171,5	178,4
Кремний четыреххлористый	205,6	213,6	225,2	234,8	245,2	260,6	273,5	287,8	309,2	327,6
Кремния оксид	—	—	1918	1979	2043	2134	2209	2289	2404	2500
Криптон	73,6	76,6	80,8	84,4	88,3	94,1	98,9	104,3	112,5	119,5
Ксенон	103,3	107,3	113,1	118,0	123,3	131,0	137,6	144,8	155,6	165,0
Лантан	2428	2516	2642	2746	2858	3022	3158	3308	3529	3717
Литий	999,4	1038	1095	1142	1193	1269	1332	1403	1508	1599
Литий бромистый	1003	1041	1096	1141	1190	1263	1323	1390	1490	1575
Литий иодистый	981,3	1013	1060	1098	1138	1197	1246	1298	1375	1440
Литий фтористый	1299	1344	1408	1461	1518	1601	1669	1744	1854	1947
Литий хлористый	1038	1077	1135	1183	1235	1312	1377	1448	1554	1645
Лютеций	2258	2371	2538	2681	2841	3085	3298	3544	3931	4285
Магний	858,4	891.8	940,2	980,3	1024	1088	1142	1202	1292	1369
Магний хлористый	1030	1071	1131	1182	1237	1318	1387	1463	1578	1678
Марганец	1494	1551	1635	1704	1780	1891	1984	2087	2241	2373
Марганец хлористый	—	936,3	988,3	1031	1079	1148	1208	1273	1371	1456
Медь	1850	1929	2044	2141	2247	2404	2539	2689	2918	3118
Медь бромистая	814,8	856,3	918,0	971,0	1030	1121	1201	1293	1439	1574
Медь иодистая	—	786,5	849,2	903,6	965,5	1061	1148	1249	1415	1573
Медь хлористая	783,7	827,7	894,1	951,8	1017	1119	1211	1320	1497	1666
Молибден	3326	3444	3614	3755	3906	4126	4310	4511	4807	5058
Молибдена диоксихлорид [86]	332,1	340,1	351,3	360,3	369,8	383,0	393,8	405,1	421,1	434,0
Молибдена окситетрахлорид [68]	328,3	341,4	360,3	376,0	393,2	418,5	439,8	463,5	499,1	529,8
Молибдена триоксид	971,0	1001	1045	1080	1118	1173	1218	1267	1337	1396
Молибден пятихлористый [68]	355,4	368,4	387,1	402,5	419,2	443,6	464,0	486,4	519,5	547,7

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0.5	1	2	5	10	20	50	100
Молибден шестифтористый	203,7	210,7	220,7	229,0	237,8	250,7	261,4	273,0	290,1	304,5
Монобромдиборан	176,8	184,0	194,4	203,1	212,7	226,7	238,6	251,9	271,8	289,1
Моногерман [87]	109,4	114,0	120,8	126,5	132,8	142,0	150,0	158,8	172,3	184,1
Мышьяк	635,4	653,8	679,8	700,8	723,3	755,2	781,3	809,3	849,5	882,6
Мышьяка триоксид	466,4	483,0	506,9	526,5	547,7	578,6	604,3	632,4	673,9	709,1
Мышьяк пятифтористый	151,1	155,8	162,4	167,8	173,6	181,9	188,7	196,0	206,6	215,4
Мышьяк трехбромистый	309,0	320,9	338,2	352,5	368,1	391,0	410,3	431,6	463,4	490,7
Мышьяк трехиодистый [88]	405,2	420,5	442,7	461,2	481,2	510,5	535,1	562,2	602,7	637,3
Мышьяк трехсернистый [89]	533,8	556,9	590,8	619,2	650,6	697,3	737,3	782,2	850,7	911,0
Мышьяк трехфтористый	—	—	—	—	255,3	269,5	281,3	294,2	313,1	329,1
Мышьяк треххлористый	256,7	266,4	280,3	291,8	304,3	322,6	337,9	354,8	379,9	401,4
Натрий	697,8	726,9	769,2	804,6	843,5	901,0	950,0	1004	1087	1159
Натрий бромистый	1060	1100	1157	1205	1256	1331	1395	1464	1567	1656
Натрий иодистый	1022	1059	1113	1157	1205	1274	1332	1396	1490	1570
Натрий фтористый	1329	1374	1439	1491	1548	1630	1698	1772	1881	1972
Натрий хлористый	1119	1160	1220	1269	1322	1400	1465	1536	1642	1733
Натрий цианистый	1071	1115	1180	1233	1292	1380	1454	1537	1661	1770
Натрия гидрооксид	995,2	1036	1096	1147	1202	1283	1353	1430	1548	1650
Неодим	2001	2091	2223	2335	2458	2643	2803	2982	3259	3505
Неон	15,6	16,3	17,3	18,1	19,0	20,4	21,6	23,0	25,0	26,8
Нептуний [2]	2538	2636	2778	2895	3023	3211	3369	3543	3804	4028
Нептуний шестифтористый	236,8	243,6	253,1	260,9	269,2	280,9	290,5	300,8	315,5	327,7
Никель	1656	1710	1786	1849	1916	2012	2092	2178	2303	2408
Никель хлористый	932,8	957,5	992,3	1020	1050	1091	1125	1162	1213	1255
Никеля карбонил	—	—	—	—	233,7	248,8	261,6	275,8	297,0	315,4
Ниобий	3529	3642	3803	3934	4075	4277	4444	4625	4887	5106
Ниобий пятибромистый [90]	451,4	464,2	482,3	497,0	512,5	534,7	552,8	572,1	599,8	622,6
Ниобий пятифтористый	—	—	338,1	352,9	369,1	392,8	412,9	435,2	468,6	497,6
Ниобий пятихлористый [90, 91]	—	—	381,4	395,1	409,8	431,1	448,8	467,9	495,9	519,3
Нитрозил фтористый	137,9	143,0	150,4	156,6	163,2	172,9	181,1	190,1	203,4	214,7
Нитрозил хлористый	—	—	—	—	199,4	211,9	222,4	234,0	251,4	266,4
Озон	91,7	95,9	102,0	107,2	112,9	121,5	128,9	137,3	150,3	161,8
Октахлортрисилан	314,7	326,2	342,7	356,4	371,2	392,8	410,8	430,6	459,9	484,9
Олова гидрид	130,9	136,5	144,6	151,4	158,9	170,1	179,6	190,3	206,5	220,7
Олово	1853	1926	2031	2119	2215	2355	2474	2605	2802	2972
Олово бромное	—	308,5	325,4	339,4	354,7	377,2	396,2	417,2	448,6	475,7
Олово иодное	—	399,7	421,9	440,4	460,6	490,4	515,5	543,4	585,3	621,5
Олово сернистое [92]	1029	1062	1110	1149	1190	1250	1300	1354	1432	1497
Олово хлористое	578,0	599,1	629,4	654,4	681,6	721,1	754,2	790,5	844,1	889,8
Олово хлорное	245,4	254,6	267,8	278,7	290,6	308,0	322,6	338,6	362,4	382,7
Осмий	3475	3579	3727	3846	3974	4157	4306	4467	4699	4891
Осмия тетраоксид:										
белый	261,2	270,6	284,1	295,2	307,2	324,7	339,3	355,2	378,8	398,8
желтый	268,3	277,2	290,0	300,5	311,8	328,0	341,5	356,2	377,6	395,5
Палладий	2214	2293	2408	2502	2604	2752	2876	3012	3212	3382
Пентаборан [93]	207,9	215,9	227,6	237,3	247,9	263,4	276,5	290,9	312,5	331,1
Пентадейтероборан [93]	207,1	215,1	226,8	236,5	247,0	262,5	275,5	289,9	311,5	330,1
Перхлорилфторид [94, 95]	140,6	146,1	154,1	160,7	167,9	178,4	187,4	197,2	212,0	224,7
Платина	2772	2859	2983	3085	3193	3349	3478	3616	3817	3985
Платина шестифтористая [96]	230,6	238,2	249,0	257,8	267,3	281,0	292,3	304,5	322,4	337,4
Плутоний	2193	2278	2402	2505	2617	2782	2921	3075	3305	3503
Плутоний шестифтористый	—	—	—	261,7	270,4	282,9	293,2	304,2	320,1	333,3
Полоний	757,9	788,3	832,5	869,4	909,7	969,1	1019	1075	1159	1231
Протактиний	2937	3042	3193	3317	3452	3648	3811	3990	4254	4478
Радий	1038	1084	1151	1208	1271	1365	1446	1537	1676	1800
Радон	125,4	130,7	138,3	144,7	151,7	162,1	170,9	180,8	195,8	208,8

Продолжение табл. 11.3

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Рений	3972	4107	4299	4456	4626	4871	5074	5295	5619	5891
Рений семифтористый [97]	226,5	234,6	246,1	255,6	265,8	280,7	293,1	306,7	326,7	343,7
Рений шестифтористый [97]	209,6	216,2	225,7	233,4	241,6	253,5	263,3	273,9	289,2	302,0
Рения окситетрахлорид [98]	307,1	319,4	337,4	352,5	368,9	393,1	413,6	436,4	470,8	500,5
Рения семиокись	475,0	486,5	502,6	515,6	529,2	548,3	563,7	580,0	603,1	621,8
Родий	2764	2851	2975	3075	3183	3338	3465	3603	3802	3968
Ртути диметил [84]	227,7	236,6	249,4	260,0	271,6	288,6	303,0	318,8	342,5	362,9
Ртуть	399,2	414,3	436,1	454,1	473,8	502,5	526,6	553,2	592,7	626,6
Ртуть бромистая	399,9	412,9	431,5	446,7	463,0	486,5	505,9	526,9	557,6	583,2
Ртуть иодистая	420,6	434,5	454,3	470,5	487,9	513,0	533,7	556,3	589,1	616,7
Ртуть хлористая	403,5	415,8	433,3	447,5	462,7	484,5	502,3	521,6	549,4	572,4
Рубидий	555,4	580,3	616,9	647,8	681,9	733,0	777,0	826,6	902,9	970,6
Рубидий бромистый	1035	1074	1130	1176	1227	1300	1362	1430	1530	1616
Рубидий иодистый	1002	1040	1094	1139	1188	1260	1320	1386	1485	1569
Рубидий фтористый	1149	1185	1235	1277	1321	1384	1436	1491	1572	1640
Рубидий хлористый	1045	1085	1142	1189	1241	1317	1380	1451	1555	1644
Рутений	3170	3267	3404	3516	3635	3805	3945	4096	4313	4494
Рутения тетраоксид [99, 100]	261,1	270,5	284,0	295,1	307,1	324,6	339,3	355,3	378,9	399,0
Самарий	1208	1252	1316	1369	1426	1510	1580	1657	1771	1868
Самарий хлористый [78]	1460	1512	1587	1648	1714	1811	1891	1980	2109	2219
Свинец	1233	1284	1357	1418	1485	1584	1668	1761	1902	2024
Свинец бромистый	770,3	798,0	837,9	870,9	906,5	958,3	1001	1049	1119	1178
Свинец иодистый	735,4	762,1	800,6	832,4	866,8	917,0	958,9	1004	1072	1130
Свинец сернистый	1105	1138	1185	1223	1263	1321	1368	1419	1492	1553
Свинец фтористый	—	1061	1114	1157	1204	1272	1329	1391	1483	1561
Свинец хлористый	805,2	833,5	874,2	907,7	943,9	996,4	1040	1087	1158	1217
Свинца оксид	1199	1238	1293	1338	1387	1456	1514	1576	1666	1742
Селен	612,9	634,5	665,5	691,1	718,7	758,8	792,3	828,8	882,5	928,1
Селена диоксид	425,5	437,8	455,1	469,2	484,3	505,6	523,1	541,8	568,7	590,9
Селена оксихлорид	304,4	314,2	328,2	339,7	352,0	369,7	384,3	400,1	423,1	442,3
Селен четыреххлористый	343,2	352,4	365,3	375,7	386,8	402,4	415,1	428,7	448,0	463,8
Селен шестифтористый	152,6	157,8	165,3	171,5	178,1	187,7	195,6	204,3	217,0	227,7
Сера	445,8	463,0	487,7	508,3	530,6	563,4	591,0	621,5	666,9	706,0
Сера хлористая	260,3	270,0	284,1	295,8	308,5	327,1	342,7	359,8	385,3	407,2
Сера шестифтористая	138,3	143,2	150,2	156,0	162,2	171,3	178,8	187,1	199,2	209,5
Серебро	1578	1635	1718	1786	1861	1969	2059	2158	2305	2430
Серебро иодистое	1071	1115	1179	1233	1292	1379	1453	1535	1660	1768
Серебро хлористое	1164	1208	1272	1325	1383	1467	1538	1616	1732	1832
Серная кислота	412,6	426,0	445,1	460,8	477,6	501,8	521,8	543,5	575,0	601,4
Сернистый ангидрид	172,7	178,7	187,4	194,5	202,2	213,3	222,6	232,8	247,7	260,3
Серный ангидрид (α)	230,8	237,1	246,1	253,4	261,1	272,1	281,0	290,5	304,1	315,3
Серный ангидрид (β)	236,3	242,4	251,0	258,0	265,3	275,7	284,1	293,0	305,8	316,1
Серный ангидрид (γ)	255,3	260,9	268,7	274,9	281,4	290,5	297,7	305,4	316,1	324,7
Сероводород	136,0	141,0	148,3	154,3	160,8	170,4	178,4	187,2	200,2	211,3
Силан [3, 101]	96,2	100,2	106,0	110,9	116,2	124,1	130,9	138,3	149,7	159,6
Синильная кислота	197,8	204,5	214,1	222,0	230,6	242,9	253,1	264,2	280,5	294,3
Стибин [102]	—	—	169,4	177,1	185,6	198,2	208,9	220,8	238,9	254,6
Стронций	979,9	1020	1080	1130	1185	1266	1335	1412	1529	1631
Стронций хлористый [63]	1553	1610	1693	1761	—	—	—	—	—	—
Стронция оксид	2314	2370	2449	2512	2578	—	—	—	—	—
Сульфурил хлористый	—	221,7	233,8	244,0	255,0	271,1	284,8	299,9	322,6	342,1
Сурьма	999,1	1051	1128	1195	1270	1385	1486	1604	1792	1967
Сурьма пятифтористая	271,9	281,7	295,7	307,3	319,8	338,0	353,2	369,9	394,4	415,3
Сурьма пятихлористая	291,3	301,8	317,0	329,6	343,1	362,9	379,5	—	—	—
Сурьма трехбромистая	362,2	374,2	393,2	408,3	424,6	448,2	467,9	489,5	521,1	547,9
Сурьма трехиодистая	429,4	445,5	468,9	488,2	509,2	539,9	565,7	594,1	636,3	672,5
Сурьма треххлористая	312,4	324,0	340,8	354,6	369,6	391,5	409,9	430,1	460,1	485,7
Сурьмы триоксид	778,0	821,1	886,1	942,5	1006	1105	1195	1300	1470	1633
Таллий	1086	1128	1190	1241	1297	1379	1448	1525	1640	1739
Таллий бромистый	—	711,4	749,6	781,4	816,0	866,7	909,4	956,6	1027	1087

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Таллий иодистый	699,1	725,2	762,8	794,0	827,7	877,1	918,5	964,1	1031	1089
Таллий пятифтористый	327,7	339,5	356,5	370,5	385,7	407,7	426,2	446,4	476,3	501,6
Таллий сернистый [89]	926,6	963,4	1016	1061	1110	1181	1242	1309	1409	1496
Таллий хлористый	—	707,4	744,9	776,1	809,9	859,5	901,2	947,2	1015	1074
Тантал	3925	4044	4213	4350	4496	4706	4878	5063	5331	5552
Тантал пятибромистый [90]	430,2	442,8	460,7	475,2	490,7	512,8	530,8	550,2	578,1	601,2
Тантал пятифтористый	—	—	—	—	—	367,5	392,0	419,8	463,4	502,9
Тантал пятихлористый [91, 103]	341,8	354,0	371,6	386,2	401,9	424,7	443,8	464,7	495,5	521,7
Теллур [3, 104—106]	775,0	806,1	851,4	889,1	930,4	991,2	1042	1099	1185	1260
Теллур четыреххлористый	—	—	479,6	497,5	516,9	544,8	568,1	593,4	630,6	662,0
Теллур шестифтористый	159,1	164,4	172,0	178,2	184,8	194,4	202,4	211,0	223,6	234,2
Тербий [77]	2350	2430	2520	2615	2730	2850	3060	3200	3410	3660
Тетраборан	179,1	186,2	196,5	205,1	214,5	228,3	239,9	252,8	272,2	288,9
Тетрагидропентаборан	219,6	227,7	239,4	249,0	259,5	274,8	287,6	301,6	322,4	340,2
Тетраметилгерманий	195,9	203,6	214,8	224,1	234,3	249,2	261,9	275,9	296,8	314,9
Тетрасилан	241,2	250,0	262,7	273,1	284,5	301,0	314,8	330,0	352,5	371,6
Тетрафторгидразин	115,1	120.2	127.6	133,9	140,8	151,1	160,0	169.9	185.2	198,7
Технеций	3365	—	—	3750	—	—	4360	—	4699	4967
Технеций шестифтористый [107]	221,0	228,2	238,5	246,9	255,9	268,8	279,6	291,2	308,1	322,3
Технеция гептаоксид [108]	389,6	403,1	422,4	438,3	455,5	480,3	501,0	523,5	556,5	584,5
Тионилбромид	262,5	272,4	286,8	298,7	311,7	330,6	346,6	364,1	390,3	412,7
Тионилфторид [109]	146,7	152,1	159,9	166,3	173,3	183,4	192,0	201,3	215,2	227,0
Тионилхлорид	212,8	221,6	234,3	244,9	256,5	273,6	288,2	304,4	328,9	350,2
Титан	2450	2524	2630	2716	2807	2939	3046	3162	3330	3469
Титан четыреххлористый [110]	255.4	265.3	279,5	291.4	304.3	323.1	339.1	356.6	382.9	405.4
Торий	3010	—	—	3340	—	—	3855	—	4308	4470
Трибромсилан	237,7	247,1	260,7	272,1	284,5	302,7	318,1	335,2	360,8	382,9
Трибромфторсилан	222,4	231,0	243,6	254,0	265,3	282,0	296,1	311,6	334,8	354,9
Тригерман	232,1	241,6	255,5	267,1	279,8	298,5	314,5	332,2	359,1	382,4
Трисилан	200,0	208,1	219,7	229,5	240,1	255,8	269,1	283,8	306,0	325,2
Трифторсилан	118,7	122,7	128,6	133,3	138,5	146,0	152,2	158,9	168,8	177,2
Трихлоргерман	227,3	235,4	247,0	256,5	266,9	281,8	294,3	308,0	328,1	—
Трихлорсилан	188,7	196.2	206,9	215,8	225,6	239,9	252.0	265,4	285,5	302,8
Углерод (графит)	3353	3480	3663	3814	3978	4219	4421	4644	4975	5258
Углерода диоксид	135,8	140,1	146,1	151,0	156,3	163,8	170,0	176,7	186,4	194,5
Углерода недокись [111]	173,7	180,5	190,4	198,5	207,5	220,6	231,6	243,8	262,1	277,9
Углерода оксид	49,8	51,8	54,7	57,0	59,7	63,5	66,7	70,4	75,8	80,4
Уран	2691	2788	2929	3045	3171	3354	3508	3676	3924	4136
Уран четырехфтористый [112]	1202	1239	1292	1335	1381	1447	1502	1560	1645	1716
Уран шестифтористый	239,3	246,1	255,6	263,2	271,4	283,0	292,5	302,6	317,1	329,0
Фосфин	—	—	—	—	133,5	142,9	150,9	159,9	173,5	185,5
Фосфоний бромистый	226,4	232,8	241,8	249,0	256,8	267,7	276,6	286,2	299,9	311,1
Фосфоний иодистый	244,7	251,5	261,1	268,9	277,1	288,8	298,4	308,5	323,1	335,1
Фосфоний хлористый	179,4	184,3	191,3	197,0	203,0	211,5	218,5	225,9	236,5	245,2
Фосфор желтый	341,3	354,6	373,8	389,9	407,3	432,9	454,5	478,4	514,2	545,0
Фосфор красный	503,3	517,4	537,1	553,1	570,1	594,2	613,9	634,8	664,9	689,6
Фосфора оксихлорид	—	—	258,5	269,6	281,6	299,4	314,3	330,9	355,6	376,9
Фосфора пентаоксид (метастабильная форма)	456,6	469,6	487,9	502,8	518,6	541,0	559,4	579,0	607,2	630,4
Фосфора пентаоксид (стабильная форма)	650,1	666.3	688.8	707.0	726.1	753.0	774.7	797,7	830,3	856,8
Фосфора тиобромид	318,6	328,0	341,4	352,3	363,9	380,4	393,9	408,5	429,4	446,7
Фосфора тиохлорид	249,9	259,5	273,2	284,7	297,2	315,4	330,7	347,7	372,9	394,6
Фосфора триоксид	—	291,8	307,5	320,6	334,8	355,6	373,2	392,6	421,6	446,5
Фосфор пятихлористый	323,0	331,3	343.0	352,4	362,3	376,4	387,7	399,8	416,9	430,9
Фосфор трехбромистый	275,4	286,3	302,3	315,6	330,1	351,4	369,5	389,5	419,6	445,7
Фосфор треххлористый	217,0	225,5	237,7	247,8	258,9	275,1	288,8	303,9	326,5	345,9
Франций	486,8	509,4	542,8	571,1	602,6	649,8	690,8	737,4	809,4	874,0

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Фтор	49,7	51,9	55,1	57,7	60,7	65,1	68,8	73,0	79,4	85,1
Фтора оксид	76,5	79,7	84,5	88,5	92,9	99,4	105,0	111,2	120,7	129,0
Фторсилан	116,6	120,5	126,2	130,8	135,7	142,9	148,8	155,2	164,7	172,6
Фтортрихлорсилан	176,5	183,4	193,5	201,8	210,9	224,3	235,6	248,1	266,8	282,9
Хлор	149,9	155,6	163,9	170,7	178,1	189,0	198,1	208,2	223,2	236,1
Хлора диоксид	—	—	201,7	209,5	217,9	230,1	240,3	251,4	267,9	281,8
Хлора оксид	171,8	178,5	188,3	196,3	205,2	218,1	229,0	241,1	259,2	274,7
Хлора гексаоксид	276,0	285,6	299,2	310,5	322,6	340,2	354,9	370,8	394,2	414,0
Хлорный ангидрид	224,5	232,9	245,2	255,3	266,3	282,5	296,0	310,9	333,1	352,2
Хлорсилан	151,7	157,6	166,0	173,0	180,6	191,7	201,1	211,4	226,8	240,1
Хлорсульфоновая кислота	300,8	309,8	322,6	333,0	344,1	359,9	372,9	386,8	407,0	423,6
Хлортрифторсилан	126,0	131,0	138,1	144,1	150,6	160,1	168,2	177,1	190,4	201,9
Хлор трехфтористый	—	178,5	188,9	197,5	207,0	221,1	233,1	246,4	266,5	284,1
Хлор фтористый	—	122,2	127,7	132,2	137,0	144,0	149,8	156,0	165,1	172,7
Хром	1939	2002	2093	2167	2247	2362	2457	2559	2709	2835
Хрома карбонил	305,6	314,5	327,0	337,1	347,8	363,2	375,7	389,1	408,4	424,3
Хромил хлористый	249,4	258,5	271,7	282,7	294,5	311,7	326,2	342,1	365,5	385,6
Цезий	532,1	556,5	592,3	622,7	656,3	706,8	750,4	799,8	876,0	944,1
Цезий бромистый	1003	1041	1095	1140	1189	1260	1320	1386	1484	1567
Цезий иодистый	993,5	1030	1083	1127	1175	1245	1304	1368	1464	1546
Цезий фтористый	966,5	1003	1055	1099	1146	1216	1274	1338	1433	1515
Цезий хлористый	1000	1038	1092	1137	1186	1257	1317	1383	1482	1566
Церий	2070	2152	2270	2369	2477	2636	2770	2918	3141	3334
Цинк	750,4	778,9	820,2	854,4	891,6	946,1	991,9	1042	1117	1182
Цинка диметил [84]	201,7	209,2	220,0	229,0	238,7	252,8	264,7	277,8	297,2	313,8
Цинк бромистый [113]	636,5	657,2	686,7	710,8	736,7	773,9	804,6	838,0	886,5	927,1
Цинк сернистый [114]	1313	1352	1406	1451	1498	1566	1621	1680	—	—
Цинк фтористый	1475	1516	1573	1618	1667	1736	1792	1852	1938	2008
Цинк хлористый [3, 83, 113]	684,3	705,6	735,9	760,5	786,9	824,7	855,8	889,3	937,9	978,3
Цирконий	3190	3292	3436	3554	3680	3861	4011	4172	4407	4603
Цирконий четырехбромистый	475,7	487,6	504,3	517,7	531,8	551,8	567,8	584,9	609,1	628,7
Цирконий четырехиодистый	531,5	544,8	563,5	578,5	594,3	616,6	634,6	653,6	680,7	702,7
Цирконий четыреххлористый	454,2	466,0	482,6	495,9	510,0	529,9	546,0	563,1	587,5	607,4

Таблица 11.4. **Давление пара элементов и некоторых простейших соединений (выше 10^5 Па) при различной температуре [115]**

T, К	p, 10^5 Па	T, К	p, 10^5 Па	T, К	p, 10^5 Па	T, К	p, 10^5 Па
Азот N_2		108	13,03	270	3,819	90	1,337
		110	14,67	280	5,518	92	1,622
		112	16,45	290	7,753	94	1,952
78	1,093	114	18,36	300	10,624	96	2,329
80	1,369	116	20,47	310	14,249	98	2,758
82	1,694	118	22,72	320	18,66	100	3,243
84	2,074	120	25,15	330	24,22	102	3,787
86	2,515	122	27,77	340	30,82	104	4,397
88	3,022	124	30,57	360	38,70	106	5,074
90	3,600	126	33,57	370	58,91	108	5,825
92	4,256	126,25	33,96	380	71,54	110	6,652
94	4,995			390	86,06	112	7,562
96	5,824	**Аммиак NH_3**		400	102,8	114	8,557
98	6,748			405,6	113,0	116	9,643
100	7,775					118	10,82
102	8,910	240	1,0258	**Аргон Ar**		120	12,11
104	10,16	250	1,6536			122	13,49
106	11,53	260	2,559	88	1,091	124	14,99

T, К	p, 10^5 Па
126	16,60
128	18,33
130	20,20
132	22,19
134	24,32
136	26,31
138	29,04
140	31,64
142	34,41
144	37,36
146	40,50
148	43,83
150	47,39

Вода тяжелая D_2O (t, °С)

110	1,3728
120	1,9134
130	2,6170
140	3,518
150	4,653
160	6,066
170	7,802
180	9,911
190	12,445
200	15,462
210	19,028
220	23,194
230	28,031
240	33,606
250	39,993
260	47,280
270	55,527
280	64,834
290	75,288
300	86,968
305	93,323
310	100,01
315	107,07
320	114,54
325	122,38
330	130,65
335	139,37
340	148,54
345	158,20
350	168,35
355	178,98
360	190,16
365	202,12
370	214,68
371	217,22

Водород H_2

21	1,209
22	1,584
23	2,036
24	2,574
25	3,206
26	3,942
27	4,789
28	5,755
29	6,848
30	8,077
30,5	8,747
31	9,455
31,5	10,20
32	11,00
32,5	11,84
33	12,73
33,23	13,16

Вольфрам шестифтористый WF_6 [116]

304,2	1,73
314,2	2,39
324,2	3,18
334,1	4,21
344,1	5,48
354,1	7,02
364,0	8,80
374,0	11,01
383,3	13,53
393,8	16,57
403,7	19,96
413,7	23,88
423,6	28,40
433,5	33,50
443,5	39,35

Гелий ^4He [117]

4,25	1,0401
4,30	1,0894
4,35	1,1402
4,40	1,1927
4,45	1,2468
4,50	1,3026
4,55	1,3601
4,60	1,4193
4,65	1,4803
4,70	1,5431
4,75	1,6078
4,80	1,6743
4,85	1,7427
4,90	1,8131
4,95	1,8855
5,00	1,9600
5,05	2,0367
5,10	2,1158
5,15	2,1976
5,19	2,2654

Калий K

1050	1,217
1100	1,864
1150	2,745
1200	3,913
1250	5,415
1300	7,304
1350	9,628
1400	12,44
1450	16,1
1500	20,0
1550	24,6
1600	29,8
1650	35,6
1700	42,0
1750	49,2
1800	57,0
1850	65,4
1900	74,5
1950	84,3
2000	94,7
2050	105,6
2100	117,2
2150	129,4
2170	134,4

Кислород O_2

90,18	1,013
92	1,221
94	1,486
96	1,793
98	2,145
100	2,546
102	3,002
104	3,515
106	4,090
108	4,731
110	5,443
112	6,229
114	7,095
116	8,045
118	9,083
120	10,21
122	11,44
124	12,78
126	14,22
128	15,77
130	17,44
132	19,24
134	21,17
136	23,24
138	25,45
140	27,82
142	30,34
144	33,04
146	35,91
148	38,97
150	42,23
152	45,69
154,77	50,87

Криптон Kr

120	1,031
122	1,202
124	1,395
126	1,610
128	1,849
130	2,114
132	2,406
134	2,728
136	3,080
138	3,465
140	3,884
142	4,339
144	4,832
146	5,364
148	5,938
150	6,556
152	7,218
154	7,928
156	8,687
158	9,497
160	10,36

Ксенон Xe

166	1,071
168	1,199
170	1,337
172	1,488
174	1,651
176	1,827
178	2,017
180	2,222
182	2,442
184	2,678
186	2,930
188	3,200
190	3,487
192	3,794
194	4,119
196	4,465
198	4,832
200	5,220
202	5,631
204	6,064
206	6,522
208	7,004
210	7,511
212	8,045
214	8,605
216	9,194
218	9,810
220	10,46
222	11,13
224	11,84

Литий Li

1650	1,283
1700	1,771
1750	2,399
1800	3,191
1850	4,179
1900	5,397
1950	6,871
2000	8,639
2100	12,4
2200	18,3
2300	26,1
2400	33,1
2500	49,1
2600	66,1

T, К	p, 10^5 Па
2700	87,1
2800	113,7
2900	146,5
3000	186,6
3100	235,4
3200	295,2
3300	365,8
3400	449,9
3500	550,5
3600	668,2
3700	806,7
3800	968,3

Молибден шестифтористый MoF_6 [118]

323,2	1,73
333,2	2,36
343,2	3,15
353,2	4,15
363,2	5,33
373,2	6,79
383,2	8,52
393,2	10,50
403,2	12,90
413,2	15,63
423,2	18,72
433,2	22,33
443,2	26,25
453,2	30,70
463,2	35,90
473,2	41,75
483,2	48,55

Натрий Na

1200	1,504
1250	2,244
1300	3,216
1350	4,563
1400	6,256
1450	8,383
1500	11,014
1550	14,6
1600	18,6
1650	23,4
1700	29,0
1750	35,6
1800	43,0
1850	51,6
1900	61,2
1950	72,1
2000	84,1
2050	97,5
2100	112,1
2125	120,0

Неон Ne

28	1,3210
29	1,7351
30	2,2381
31	2,8402
32	3,5526
33	4,3860
34	5,3518
35	6,4618
36	7,7282
37	9,1637
38	10,7820
39	12,597
40	14,625
41	16,882
42	19,387
43	22,157
44	25,217
44,4	26,54

Ртуть Hg (t, °C)

360	1,0772
380	1,5207
400	2,1024
420	2,852
440	3,801
460	4,986
480	6,446
500	8,222
520	10,358
540	12,901
560	15,899
580	19,403
600	23,46
620	28,14
640	33,47
660	39,53
680	46,36
700	54,03
720	62,59
740	72,10
760	82,60
780	94,17
800	106,85

Рубидий Rb

1000	1,467
1050	2,241
1100	3,295
1150	4,684
1200	6,466
1250	8,698
1300	11,43
1350	14,7
1400	18,6
1450	23,2
1500	28,5
1550	34,5

Сера шестифтористая SF_6 [118]

278,65	14,86
285,22	17,61
293,31	21,51
303,37	27,26
313,29	33,79
317,10	36,87

Сернистый ангидрид SO_2 (t, °C)

—10	1,01
10	2,23
20	3,30
30	4,62
40	6,30
50	8,48
60	11,15
70	14,26
80	18,02
90	22,49
100	27,77
110	33,96
120	41,12
130	49,40
140	58,91
150	69,74
157,5	78,82

Углерода диоксид CO_2

216,55	5,18
220	6,00
225	7,34
230	8,91
235	10,75
240	12,82
245	15,18
250	17,87
255	20,85
260	24,21
265	27,87
270	32,03
273,15	34,839
274	35,633
275	36,576
276	37,543
277	38,521
278	39,520
279	40,547
280	41,588
281	42,654
282	43,732
283	44,831
284	45,956
285	47,096
286	48,261
287	49,450
288	50,666
289	51,895
290	53,148
291	54,432
292	55,732
293	57,066
294	58,421
295	59,802
296	61,205
297	62,639
298	64,098
299	65,598
300	67,115
301	68,661
302	70,246
303	71,858
304,19	73,815

Углерода оксид CO (t, °C)

—191,52	1,013
—187,79	1,520
—184,90	2,026
—182,55	2,532
—180,53	3,039
—177,04	4,052
—174,17	5,065
—171,69	6,078
—169,49	7,091
—167,46	8,104
—163,98	10,13
—161,02	12,16
—158,32	14,18
—155,94	16,21
—153,65	18,23
—151,70	20,26
—147,18	25,32
—143,30	30,39
—140,23	34,98

Уран шестифтористый UF_6 [119]

364,0	3,33
374,0	4,28
383,8	5,44
393,8	6,84
403,7	8,47
413,7	10,38
423,6	12,59
433,5	15,15
443,5	18,01
453,4	21,28
463,3	24,98
473,2	29,13
483,2	33,93
493,0	39,08
502,9	45,08

Фтор F_2

95,0	2,775
97,5	3,465
100,0	4,282
102,5	5,236
105,0	6,340
107,5	7,602
110,0	9,029
112,5	10,63
115,0	12,41
117,5	14,39
120,0	16,59
122,5	19,03
125,0	21,73
127,5	24,70
130,0	27,98
132,5	31,59

T, К	p, 10^5 Па	T, К	p, 10^5 Па	T, К	p, 10^5 Па	T, К	p, 10^5 Па
135,0	35,57	32,22	9,279	**Цезий Cs**		1500	27,6
137,5	39,93	43,33	12,207			1550	33,0
140,0	44,69	54,44	15,752	950	1,086	1600	38,9
142,5	49,87	65,56	19,997	1000	1,693	1650	45,4
144,0	53,25	76,67	25,011	1050	2,527	1700	52,4
		87,78	30,886	1100	3,629	1750	60,0
Хлор Cl_2 (t, °C)		98,89	37,694	1150	5,038	1800	68,2
		110,00	45,544	1200	6,790	1850	77,0
—34,04	1,013	121,11	54,520	1250	8,889	1900	86,2
—23,33	1,580	132,22	64,751	1300	11,41	1950	96,0
—12,22	2,411	137,78	70,363	1350	15,0	2000	106,3
—1,11	3,535	143,33	76,340	1400	18,7	2050	117,0
10,00	5,014	144,00	77,089	1450	22,9		
21,11	6,909						

11.3. ПАРЫ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Таблица 11.5. **Температура насыщения органических веществ, К; $p = 0{,}1 \div 100$ кПа** [3]

В таблице приведены значения температуры, при которой устанавливается указанное давление пара

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Адипиновая кислота	425,8	438,9	457,6	472,8	489,1	512,4	531,6	552,3	582,2	607,1
Акриловая кислота	272,5	282,1	296,0	307,5	319,8	337,8	352,8	369,2	393,3	413,8
Акрилонитрил	217,5	226,1	238,4	248,7	259,9	276,4	290,3	305,7	328,8	348,7
Акролеин	204,3	212,1	223,4	232,8	243,0	258,0	270,6	284,5	305,3	323,1
Аллен	148,9	154,6	162,8	169,7	177,2	188,1	197,4	207,5	222,7	235,8
Аллилдихлорэтилсилан	265,1	275,4	290,1	302,4	315,8	335,3	351,8	370,1	397,2	420,6
Аллилизопропиловый эфир	225,5	233,9	246,1	256,1	267,0	283,0	296,4	311,1	332,9	351,5
Аллилизотиоцианат	267,8	278,1	293,0	305,4	318,8	338,5	355,1	373,5	400,8	424,3
Аллиловый спирт	249,4	257,7	269,7	279,5	290,1	305,3	318,0	331,7	351,8	368,7
Аллилпропиловый эфир	229,4	238,2	250,8	261,3	272,6	289,3	303,3	318,8	341,8	361,5
Аллилтрихлорсилан	248,8	258,1	271,5	282,6	294,6	312,2	327,0	343,3	367,4	388,0
Амилизопропионат	276,7	287,1	302,0	314,4	327,8	347,5	364,0	382,1	409,0	432,1
Амиловый спирт	281,5	290,5	303,3	313,8	325,1	341,2	354,6	369,0	390,0	407,5
трет-Амиловый спирт	256,3	264,6	276,4	286,1	296,5	311,5	323,9	337,3	356,8	373,1
Амилтриметилсилан	258,8	268,8	283,1	295,0	308,0	327,0	342,9	360,6	386,9	409,5
Анизол	273,3	283,5	298,3	310,5	323,8	343,2	359,4	377,3	403,9	426,7
Анилин	300,4	310,9	325,9	338,3	351,7	371,1	387,2	404,8	430,7	452,6
2-Анилинэтанол	371,3	383,8	401,8	416,5	432,4	455,3	474,3	495,0	525,2	550,7
Анисовый альдегид	340,5	352,7	370,2	384,6	400,3	422,9	441,9	462,6	493,2	519,2
Ацетальдегид	187,9	194,8	204,8	213,1	222,0	235,1	246,1	258,1	276,0	291,2
Ацетальдоксим	263,1	271,8	284,3	294,5	305,4	321,2	334,3	348,4	369,1	386,5
Ацетамид	332,6	343,8	359,9	373,1	387,3	407,8	424,8	443,3	470,4	493,2
Ацетанилид	380,9	394,2	413,4	429,2	446,3	471,0	491,6	514,1	547,2	575,2
Ацетилен	127,8	132,1	138,2	143,2	148,5	156,3	162,7	169,6	179,8	188,4
Ацетон	209,7	217,5	228,9	238,3	248,5	263,4	275,9	289,7	310,2	327,7
Ацетонитрил	221,5	230,0	242,5	252,8	264,1	280,6	294,5	309,9	332,9	352,6
Ацетофенон	304,5	315,8	332,1	345,5	360,1	381,5	399,4	419,0	448,2	473,0
Бензальдегид	292,6	303,1	318,1	330,6	344,0	363,5	379,9	397,7	424,1	446,4
Бензиламин	296,8	307,5	323,0	335,7	349,5	369,6	386,4	404,9	432,1	455,2
Бензилдихлорсилан	312,9	323,5	338,7	351,2	364,7	384,1	400,2	417,8	443,5	465,1
Бензилизотиоцианат	347,0	358,8	375,5	389,3	404,1	425,5	443,2	462,5	490,8	514,6
Бензиловый спирт	323,6	334,1	349,2	361,5	374,8	393,9	409,6	426,7	451,6	472,5
Бензоил хлористый	299,7	310,9	327,1	340,5	355,0	376,3	394,2	413,8	443,0	468,0
Бензойная кислота	360,9	372,2	388,4	401,6	415,7	435,9	452,6	470,6	496,7	518,5
Бензол	229,3	237,3	248,9	258,4	268,7	283,6	296,0	309,5	329,5	346,4
Бензолсульфонилхлорид	333,1	345,7	363,8	378,9	395,2	419,1	439,2	461,3	494,2	522,4
Бензонитрил	312,0	323,3	339,6	353,1	367,7	388,9	406,6	426,1	454,8	479,3

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Бистрихлорсилан	—	—	331,0	344,7	359,5	381,2	399,4	419,5	449,3	474,8
Боринкарбонил	131,3	136,3	143,7	149,8	156,4	166,1	174,3	183,3	196,8	208,5
4-Броманизол	316,3	328,1	345,2	359,3	374,7	397,1	416,0	436,7	467,5	493,8
Бромбензол	270,8	281,1	295,9	308,2	321,6	341,2	357,6	375,8	402,7	425,9
1-Бромбутан	235,5	244,5	257,6	268,4	280,2	297,5	312,0	328,1	352,0	372,6
1-Бром-2-бутанол	292,5	301,5	314,3	324,8	335,9	351,9	365,0	379,2	399,7	416,7
1-Бром-2-бутанон	274,6	284,4	298,4	310,0	322,6	340,8	356,0	372,7	397,2	418,1
цис-2-Бром-2-бутен	229,4	238,3	251,1	261,8	273,4	290,4	304,8	320,7	344,4	364,7
транс-2-Бром-2-бутен	223,5	232,2	244,8	255,2	266,6	283,3	297,4	312,9	336,2	356,2
2-Бром-4,6-дихлорфенол	351,4	364,1	382,5	397,6	414,0	437,9	457,9	479,7	512,1	539,6
Бромистый бензоил	314,6	326,3	343,2	357,2	372,3	394,5	413,1	433,5	463,9	489,8
2-Бром-1,4-ксилол	304,8	316,3	332,8	346,5	361,3	383,0	401,3	421,4	451,2	476,7
1-Бром-3-метилбутан	247,7	257,2	270,8	282,2	294,5	312,5	327,8	344,5	369,5	390,9
2-Бром-2-нитроизопропан	235,3	243,5	255,3	265,0	275,4	290,6	303,2	317,0	337,2	354,3
3-Бромпиридин	284,3	295,0	310,3	323,0	336,8	357,0	373,9	392,5	420,2	443,8
1-Бромпропан	215,6	226,9	235,9	245,8	256,7	272,5	285,9	300,7	322,7	341,6
2-Бромпропан	207,0	215,1	226,8	236,5	247,1	262,7	275,9	290,4	312,1	330,9
α-Бромтолуол	299,8	311,1	327,4	341,0	355,7	377,2	395,3	415,2	444,8	470,1
2-Бромтолуол	291,4	302,1	317,4	330,1	343,9	364,0	380,8	399,2	426,4	449,7
3-Бромтолуол	287,4	298,6	314,8	328,4	343,1	364,7	383,0	403,1	433,3	459,4
4-Бромтолуол	283,2	294,6	311,1	324,9	340,0	362,3	381,2	402,2	433,7	461,0
3-Бром-2,4,6-трихлорфенол	380,2	393,8	413,2	429,3	446,6	471,8	492,8	515,8	549,7	578,5
Бромуксусная кислота	322,7	333,6	349,3	362,2	376,0	396,1	412,7	430,8	457,3	479,6
1,4-Бромхлорбензол	299,7	310,9	327,1	340,5	355,1	376,3	394,2	413,8	442,9	467,9
1-Бром-1-хлорэтан	230,6	238,7	250,4	260,1	270,5	285,6	298,2	311,9	332,2	349,3
1-Бром-2-хлорэтан	239,6	248,7	261,9	272,8	284,7	302,1	316,7	332,8	356,8	377,4
1-Бром-4-этилбензол	292,9	305,0	322,6	337,3	353,5	377,3	397,7	420,3	454,5	484,3
(2-Бромэтил)-бензол	315,4	327,1	344,0	357,9	373,0	395,1	413,7	434,0	464,2	490,0
1-Бромэтилен	174,3	181,5	192,0	200,7	210,2	224,4	236,4	249,8	270,0	287,6
2-Бромэтиловый-2-хлорэтиловый эфир	304,2	315,2	331,1	344,1	358,3	378,8	396,1	414,9	442,8	466,4
(2-Бромэтил)-циклогексан	305,6	317,2	334,1	348,0	363,2	385,5	404,2	424,8	455,6	482,0
1,2-Бутадиен	179,9	186,9	197,2	205,8	215,1	228,8	240,4	253,2	272,4	289,0
1,3-Бутадиен	166,6	173,2	182,6	190,5	199,0	211,6	222,2	234,0	251,6	266,7
Бутан	168,0	174,6	184,2	192,3	201,0	213,8	224,7	236,7	254,7	270,3
1,3-Бутандиол	299,0	311,3	329,1	343,9	360,2	384,3	404,7	427,5	461,8	491,6
2,3-Бутандиол	312,4	322,5	337,0	348,8	361,4	379,7	394,7	411,0	434,8	454,6
2-Бутанон	220,3	228,8	241,1	251,3	262,5	278,9	292,6	307,9	330,6	350,2
1,2,3-Бутантриол	370,3	382,3	399,3	413,2	428,1	449,5	467,2	486,4	514,2	537,5
1-Бутен	164,8	171,3	180,6	188,5	197,0	209,5	220,1	231,9	249,4	264,6
цис-2-Бутен	172,6	179,3	188,9	196,9	205,6	218,4	229,2	241,1	258,8	274,1
транс-2-Бутен	169,8	176,4	186,0	194,0	202,7	215,5	226,3	238,2	256,1	271,4
Бутенин	176,1	182,7	192,3	200,2	208,8	221,5	232,1	243,7	261,1	275,9
3-Бутеннитрил	248,7	258,1	271,6	282,8	294,9	312,7	327,6	344,1	368,5	389,4
Бутакрилат	267,4	277,4	291,9	303,9	316,9	335,9	351,9	369,4	395.5	417,9
втор-Бутилгликолат	296,3	306,8	321,8	334,1	347,5	366,8	383,0	400,6	426,5	448,5
Бутиловый спирт	268,1	276,7	289,0	299,1	309,9	325,4	338,2	352,0	372,2	389,0
втор-Бутиловый спирт	256,8	265,0	276,6	286,1	296,2	310,8	322,9	335,9	354,8	370,6
трет-Бутиловый спирт	247,9	255,5	266,4	275,2	284,6	298,1	309,2	321,1	338,4	352,8
Бутилтриметилсилан	244,8	254,1	267,5	278,7	290,8	308,5	323,5	339,9	364,4	385,4
Бутилформиат	242,2	251,2	264,2	275,0	286,7	303,8	318,1	333,9	357,3	377,3
втор-Бутилформиат	234,3	243,0	255,6	266,0	277,4	293,9	307,8	323,0	345,7	365,1
трет-Бутилформиат	235,6	244,4	257,2	267,8	279,3	296,1	310,3	325,8	348,9	368,7
втор-Бутилхлорацетат	285,0	295,3	310,3	322,7	336,1	355,6	371,9	389,8	416,3	438,9
втор-Бутилхлорид	208,8	217,3	229,5	239,8	251,0	267,4	281,4	297,0	320,4	340,7
трет-Бутилхлорид	—	—	—	—	236,9	252,8	266,3	281,3	303,9	323,6
1-Бутин	176,7	183,5	193,2	201,4	210,2	223,2	234,1	246,1	264,0	279,4
2-Бутин	194,7	201,5	211,4	219,5	228,3	241,1	251,7	263,3	280,4	294,8
Бутиронитрил	248,1	257,4	270,8	282,0	294,0	311,7	326,5	342,8	367,0	387,7
Валериановая кислота	310,9	321,2	335,9	347,9	360,9	379,5	395,0	411,7	436.2	456,7
α-Валеролактон	304,3	315,8	332,4	346,1	361,1	382,9	401,2	421,4	451,4	477,2
Валеронитрил	262,3	272,2	286,5	298,3	311,2	330,0	345,9	363,3	389,2	411,4

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Ванилин	374,7	387,5	405,7	420,7	436,8	460,1	479,4	500,5	531,3	557,3
Винилацетат	221,2	229,4	241,4	251,2	261,9	277,5	290,7	305,1	326,5	344,8
Винилтрихлорсилан	—	—	246,6	257,4	269,2	286,5	301,1	317,4	341,7	362,8
Винилтриэтоксисилоксан	—	—	304,3	316,5	329,8	349,2	365,4	383,2	409,6	432,2
1,5-Гексадиен-3-ин	223,5	232,1	244,6	255,0	266,2	282,8	296,7	312,1	335,1	354,9
Гексаметилдисилоксан	239,7	248,5	261,1	271,6	282,9	299,4	313,2	328,3	350,8	369,9
Гексаметилциклотрисилоксан	—	—	—	—	—	330,5	345,4	361,8	386,0	406,6
Гексан	214,6	222,8	234,6	244,4	255,1	270,8	284,0	298,5	320,1	338,7
1-Гексанол	292,5	302,1	315,8	327,0	339,0	356,3	370,6	386,1	408,7	427,6
2-Гексанол	281,7	290,8	303,7	314,3	325,6	342,0	355,4	370,0	391,3	409,0
3-Гексанол	271,3	280,7	294,2	305,3	317,2	334,6	349,0	364,7	387,8	407,3
2-Гексанон	276,4	285,2	297,7	308,0	318,9	334,6	347,6	361,6	382,0	399,0
Гексахлорбензол	382,9	396,7	416,5	432,8	450,4	476,1	497,5	521,0	555,6	585,0
Гексахлорэтан	298,7	309,6	325,3	338,2	352,2	372,6	389,7	408,4	436,1	459,7
1-Гексен	211,2	219,4	231,3	241,2	251,9	267,7	281,0	295,7	317,6	336,6
Гептан	234,4	243,3	256,1	266,7	278,3	295,2	309,5	325,1	348,5	368,5
1-Гептанол	308,9	318,7	332,5	343,9	356,0	373,4	387,7	403,1	425,6	444,3
2-Гептанои	289,1	298,7	312,3	323,4	335,4	352,6	366,9	382,4	405,0	424,0
4-Гептанон	291,7	300,7	314,3	323,8	334,9	350,8	363,9	378,0	398,4	415,3
2-Гептен	232,7	241,6	254,6	265,4	277,1	294,3	308,7	324,7	348,6	369,1
Гидрохинон	392,4	404,0	420,5	433,9	448,1	468,5	485,2	503,1	528,9	550,2
Гликольацетат	306,0	316,8	332,2	344,8	358,5	378,3	394,8	412,9	439,4	461,8
Глицерин	391,7	403,7	420,7	434,6	449,4	470,7	488,1	506,9	534,1	556,6
Глутаровая кислота	423,8	435,2	451,4	464,4	478,2	497,7	513,6	530,5	554,7	574,5
Глутаровый ангидрид	368,5	381,5	400,2	415,7	432,4	456,6	476,8	498,8	531,4	558,9
Глутаронитрил	357,9	371,2	390,4	406,2	423,5	448,6	469,7	492,9	527,3	556,7
Глутерилхлорид	324,0	335,4	351,7	365,1	379,5	400,5	418,0	437,0	465,1	488,8
Дегидрацетовая кислота	359,0	371,4	389,4	404,1	420,0	443,0	462,2	483,1	513,9	539,9
Диаллидихлорсилан	277,2	287,6	302,8	315,4	329,0	349,0	365,8	384,3	411,8	435,4
Диаллилсульфид	258,6	268,5	282,9	294,8	307,8	326,8	342,8	360,5	386,8	409,4
Диацетамид	336,7	347,8	363,6	376,7	390,6	410,8	427,5	445,5	471,9	494,1
1,4-Дибромбензол	320,7	331,9	347,9	361,1	375,4	396,0	413,2	432,0	459,6	482,9
1,2-Дибромбутан	275,4	286,1	301,4	314,2	328,1	348,4	365,6	384,6	412,8	437,2
dl-2,3-Дибромбутан	272,5	283,0	298,1	310,7	324,4	344,5	361,4	380,1	407,9	431,8
мезо-2,3-Дибромбутан	269,6	280,0	295,0	307,5	321,1	341,0	357,8	376,3	404,0	427,8
1,4-Дибромбутан	299,5	310,7	326,9	340,4	355,0	376,3	394,2	413,9	443,2	468,2
α, β-Диброммалеиновый ангидрид	317,8	329,3	345,7	359,3	374,1	395,5	413,4	433.0	461.9	486,6
Дибромметан	234,0	242,9	255,8	266,5	278,2	295,2	309,6	325,4	349,0	369,2
1,2-Дибром-2-метилпропан	238,5	249,3	265,0	278,4	293,1	315,2	334,2	355,7	388,7	418,0
1,3-Дибром-2-метилпропан	282,0	292,6	308,0	320,7	334,6	354,8	371,8	390,5	418,3	442,2
1,2-Дибромпентан	287,9	298,5	313,7	326,3	340,0	359,9	376,6	394,9	422,0	445,2
1,2-Дибромпропан	261,1	271,0	285,4	297,3	310,2	329,1	345,1	362,6	388,8	411,2
2,3-Дибром-1-пропанол	324,5	335,9	352,2	365,7	380,2	401,3	418,9	438,1	466,3	490,2
2,3-Дибромпропилен	262,1	272,1	286,4	298,4	311,3	330,3	346,2	363,8	389,9	412,3
1,2-Дибромэтан	245,6	255,9	270,9	283,5	297,3	317,7	335,2	354,6	384,1	409,9
(1,2-Дибромэтил)-бензол	353,8	365,8	382,9	397,0	412,1	434,0	452,2	471,9	500,8	525,1
Ди-(2-бромэтиловый) эфир	315,1	326,5	342,8	356,4	371,0	392,3	410,1	429,6	458,4	482,9
Дибутилдисульфид	299,5	315,2	338,8	359,1	382,0	417,1	448,3	484,6	542,6	596,6
Дибутилсульфид	292,5	303,4	319,2	332,2	346,3	367,0	384,3	403,4	431,7	455,9
Диизобутиламин	263,1	273,0	287,2	298,9	311,7	330,4	346,1	363,3	388,9	410,8
Диизопропиловый эфир	211,7	219,9	231,8	241,8	252,6	268,4	281,8	296,6	318,7	337,8
Диизопропилоксалат	311,2	321,9	337,2	349,8	363,3	382,9	399,2	417,0	443,0	465,0
Диметиламин	181,6	188,2	197,6	205,4	213,9	226,1	236,4	247,6	264,2	278,3
N, *N*-Диметиланилин	297,4	308,6	324,6	338,0	352,4	373,6	391,3	410,9	439,9	464,7
Диметиларсанилат	283,5	293,6	308,2	320,2	333,2	352,0	367,8	385,1	410,5	432,1
2,2-Диметилбутан	199,6	207,4	218,8	228,2	238,5	253,6	266,4	280,5	301,6	319,9
2,3-Диметилбутан	205,3	213,3	224,9	234,6	245,1	260,6	273,6	288,1	309,7	328,3
2,2-Диметилгексан	238,8	247,9	261,0	272,0	283,8	301,2	315,9	332,0	356,1	376,7
2,3-Диметилгексан	244,9	254,2	267,6	278,8	290,9	308,6	323,5	340,0	364,4	385,4

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
2,4-Диметилгексан	239,6	248,9	262,2	273,3	285,4	303,1	318,0	334,5	359,0	380,2
2,5-Диметилгексан	241,1	250,2	263,4	274,3	286,2	303,5	318,1	334,2	358,1	378,6
3,3-Диметилгексан	241,7	250,9	264,3	275,3	287,3	304,9	319,8	336,1	360,4	381,3
3,4-Диметилгексан	245,9	255,2	268,8	280,0	292,2	310,0	325,1	341,6	366,3	387,4
Диметилборан	163,4	170,1	179,8	188,0	196,9	210,1	221,2	233,7	252,5	268,8
Диметилдихлорсилан	—	—	233,0	243,2	254,3	270,6	284,4	299,8	322,7	342,6
Диметилитаконат	337,6	347,9	362,7	374,7	387,5	405,9	420,9	437,2	460,7	480,2
Диметил-*l*-малат	342,5	354,4	371,4	385,4	400,5	422,4	440,6	460,5	489,6	514,3
Диметилмалеат	313,8	324,9	340,9	354,1	368,3	388,9	406,1	425,0	452,7	476,2
Диметилмалонат	302,9	313,3	328,2	340,4	353,5	372,6	388,4	405,6	430,9	452,2
транс-Диметилзаконат	315,0	326,1	342,1	355,2	369,4	390,1	407,3	426,0	453,7	477,1
Диметиловый эфир	154,8	160,9	169,7	177,1	185,1	196,9	206,9	217,9	234,5	248,8
Диметилоксалат	288,0	298,1	312,6	324,5	337,4	356,0	371,6	388,6	413,5	434,7
2,2-Диметилпентан	219,7	228,2	240,4	250,6	261,7	277,9	291,6	306,7	329,3	348,7
2,3-Диметилпентан	226,6	235,3	248,0	258,5	269,9	286,7	300,8	316,5	339,8	359,8
2,4-Диметилпентан	220,8	229,3	241,6	251,8	262,9	279,2	292,9	308,0	330,5	349,9
3,3-Диметилпентан	222,7	231,4	244,0	254,5	265,9	282,6	296,8	312,4	335,9	356,0
2,5-Диметил-3-пентанон	273,9	282,6	295,0	305,2	316,0	331,6	344,5	358,4	378,6	395,4
3,5-Диметил-1,2-пирон	346,1	357,9	374,8	388,7	403,6	425,1	443,1	462,6	491,1	515,2
2,2-Диметилпропан	167,2	174,3	184,7	193,4	203,0	217,2	229,3	242,9	263,5	281,5
4,6-Диметилрезорцин	316,7	328,1	344,7	358,3	373,1	394,6	412,6	432,3	461,4	486,2
Диметилсилан	154,6	160,8	169,8	177,4	185,6	197,7	208,0	219,5	236,6	251,5
Диметилсульфид	193,8	201,2	212,0	220,9	230,6	244,7	256,7	269,9	289,5	306,4
Диметилсурьма	311,9	323,4	339,9	353,6	368,5	390,1	408,3	428,2	457,7	482,9
Диметил-*dl*-тартрат	367,2	380,0	398,5	413,7	430,0	453,8	473,6	495,2	527,0	553,9
Диметил-*d*-тартрат	369,2	381,9	400,0	414,8	430,8	454,0	473,3	494,3	525,0	550,9
3,3-Диметил-2-тиобутан	233,8	242,7	255,5	266,1	277,6	294,5	308,7	324,3	347,6	367,5
Диметилфенилсилан	272,7	283,1	298,0	310,5	324,0	343,8	360,4	378,8	406,1	429,6
1,1-Диметилциклогексан	244,2	253,6	267,3	278,7	291,2	309,4	324,7	341,7	367,1	388,9
цис-1,2-Диметилциклогексан	251,6	261,3	275,3	286,9	299,5	318,5	333,6	350,8	376,5	398,5
транс-1,2-Диметилциклогексан	246,9	256,5	270,4	281,9	294,4	312,8	328,3	345,5	371,1	393,1
цис-1,3-Диметилциклогексан	248,4	257,9	271,7	283,2	295,7	314,0	329,4	346,4	371,8	393,7
транс-1,3-Диметилциклогексан	245,5	254,9	268,5	279,8	292,2	310,2	325,4	342,2	367,2	388,7
цис-1,4-Диметилциклогексан	247,9	257,5	271,4	282,9	295,4	313,7	329,2	346,3	371,8	393,8
транс-1,4-Диметилциклогексан	243,7	253,2	266,9	278,3	290,8	309,0	324,4	341,5	366,9	388,8
Диметилцитраконат	318,6	329,8	345,9	359,1	373,4	394,1	411,3	430,1	457,9	481,3
α, α-Диметилянтарный α ангидрид	328,7	340,0	356,1	369,3	383,6	404,2	421,3	440,0	467,3	490,4
1,2-Диметоксиэтан	220,3	229,4	242,6	253,6	265,6	283,4	298,6	315,5	340,9	363,1
Ди-(2-метоксиэтиловый) эфир	281,0	291,2	305,8	317,8	330,9	349,8	365,7	383,0	408,7	430,5
Ди-(нитрозометил)-амин	270,8	281,0	295,7	307,9	321,1	340,5	356,7	374,6	401,2	424,0
Ди-(нитрозоэтил)-амин	285,8	296,6	312,1	324,9	338,9	359,3	376,5	395,4	423,4	447,5
1,4-Диоксан	234,7	243,8	257,0	267,9	279,8	297,2	311,9	328,1	352,3	373,2
1,4-Диоксан-2,6-дион	—	352,5	369,4	383,4	398,4	420,3	438,4	458,2	487,3	511,9
Дипропиленгликоль	342,4	353,8	370,0	383,3	397,6	418,2	435,3	453,8	480,9	503,6
Дипропиловый эфир	225,5	234,3	247,0	257,5	269,0	285,9	300,2	315,9	339,4	359,7
Дипропилоксалат	320,4	331,7	347,8	361,1	375,5	396,3	413,7	432,6	460,5	484,1
1,2-Дипропоксиэтан	228,0	239,8	257,3	272,4	289,3	315,2	338,1	364,6	406,8	445,8
1,1-Дифторэтан	157,9	163,7	172,1	179,1	186,6	197,6	206,8	217,0	232,0	244,8
1,2-Дихлорбензол	287,7	298,4	314,0	326,9	340,9	361,3	378,5	397,4	425,5	449,5
1,3-Дихлорбензол	280,3	291,0	306,6	319,5	333,5	354,1	371,4	390,6	419,1	443,6
1,4-Дихлорбензол	—	—	309,2	322,1	336,1	356,6	373,9	393,0	421,3	445,7
1,2-Дихлорбутан	244,1	253,8	267,9	279,6	292,3	311,1	327,0	344,6	371,0	393,9
2,3-Дихлорбутан	243,1	252,5	266,1	277,4	289,6	307,7	322,9	339,7	364,8	386,3
1,5-Дихлоргексаметилтрисилоксан	293,6	304,4	320,0	332,9	346,8	367,2	384,3	403,0	430,8	454,5

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Дихлордиизопропиловый эфир	297,6	308,2	323,5	336,1	349,7	369,5	386,0	404,0	430,7	453,3
Дихлордиметилсилан	216,0	224,2	236,1	246,0	256,7	272,4	285,6	300,2	321,9	340,6
Дихлордифторметан	151,7	157,6	166,1	173,1	180,8	192,1	201,6	212,1	227,8	241,3
1,2-Дихлор-1,2-дифторэтилен	187,5	194,5	204,5	212,8	221,9	235,0	246,1	258,2	276,2	291,6
Дихлордиэтилсилан	258,8	268,3	282,1	293,4	305,7	323,7	338,7	355,2	379,7	400,5
Дихлорметан	199,4	206,9	217,7	226,6	236,3	250,5	262,4	275,5	295,0	311,6
Дихлорметиларсан	256,4	266,2	280,4	292,1	304,9	323,6	339,4	356,7	383,6	404,8
1,1-Дихлор-2-метилпропан	237,9	247,1	260,3	271,4	283,4	301,0	315,9	332,3	356,7	377,8
1,2-Дихлор-2-метилпропан	242,7	251,7	264,8	275,6	287,3	304,4	318,8	334,6	358,1	378,1
1,3-Дихлор-2-метилпропан	265,7	275,3	289,0	300,4	312,7	330,7	345,6	362,0	386,3	406,9
Дихлорметилсилан	193,7	201,4	212,5	221,7	231,8	246,7	259,2	273,1	293,9	311,9
Дихлорметилфенилсилан	302,9	314,4	330,9	344,6	359,6	381,4	399,7	419,9	450,0	475,8
1,7-Дихлороктаметилтетрасилоксан	320,4	332,1	348,8	362,7	377,7	399,6	417,9	438,0	467,7	493,0
1,2-Дихлорпропан	230,3	239,2	252,2	262,9	274,7	291,9	306,4	322,5	346,5	367,1
1,3-Дихлор-2-пропанол	295,6	305,9	320,7	332,8	346,0	365,0	380,9	398,2	423,6	445,1
2,3-Дихлорстирол	328,1	340,1	357,4	371,6	387,1	409,6	428,5	449,2	479,8	505,9
2,4-Дихлорстирол	320,7	332,5	349,5	363,5	378,7	400,9	419,5	439,9	470,1	495,9
2,5-Дихлорстирол	322,3	334,1	351,2	365,3	380,5	402,8	421,4	441,9	472,2	498,0
2,6-Дихлорстирол	315,3	326,9	343,7	357,5	372,5	394,4	412,8	432,9	462,7	488,2
3,4-Дихлорстирол	324,3	336,2	353,4	367,5	382,9	405,3	424,0	444,6	475,0	501,0
3,5-Дихлорстирол	321,3	333,0	350,0	363,9	379,1	401,2	419,7	440,0	470,0	495,6
1,3-Дихлортетраметилдисилоксан	260,8	270,6	284,7	296,4	309,2	327,8	343,4	360,6	386,1	408,0
1,2-Дихлор-1,1,2,2-тетрафторэтан	174,2	180,8	190,4	198,3	207,0	219,6	230,2	241,9	259,3	274,3
Дихлор-4-толилсилан	313,4	324,1	339,4	352,0	365,5	385,1	401,3	419,0	444,9	466,8
α, α-Дихлортолуол	302,3	314,1	331,3	345,5	361,1	383,9	403,2	424,6	456,5	484,1
3,4-Дихлор-α, α, α-трифтортолуол	279,8	290,7	306,5	319,7	334,0	355.0	372,8	392,4	421,8	447,1
Дихлоруксусная кислота	311,6	322,3	337,6	350,2	363,8	383,4	399,7	417,5	443,6	465,6
Дихлорфениларсин	332,9	345,8	364,5	380,1	397,0	421,8	442,8	465,9	500,5	530,3
α, α-Дихлорфенилацетонитрил	323,4	335,0	351,7	365,5	380,4	402,1	420,2	440,0	469,3	494,2
2,4-Дихлорфенол	320,6	331,7	347,6	360,6	374,7	395,1	412,1	430,5	457,7	480,6
2,6-Дихлорфенол	327,0	338,3	354,6	368,0	382,4	403,3	420,7	439,6	467,5	491,0
Дихлорфторметан	178,5	185,2	195,0	203,1	211,9	224,8	235,6	247,5	265,3	280,5
1,2-Дихлорэтан	224,6	233,1	245,4	255,7	266,7	283,0	296,6	311,7	334,0	353,2
1,2-Дихлор-3-этилбензол	313,7	325,6	342,8	357,0	372,5	395,2	414,3	435,4	466,7	493,5
1,2-Дихлор-4-этилбензол	315,0	327,1	344,7	359,2	375,0	398,2	417,8	439,4	471,5	499,2
1,4-Дихлор-2-этилбензол	306,3	318,3	335,6	350,0	365,6	388,7	408,1	429,6	461,8	489,5
1,1-Дихлорэтилен	192,1	199,4	210,0	218,7	228,2	242,0	253,7	266,6	285,7	302,1
цис-1,2-Дихлорэтилен	211,2	219,1	230,5	239,9	250,2	265,2	277,8	291,6	312,1	329,7
транс-1,2-Дихлорэтилен	204,0	211,6	222,6	231,6	241,5	255,9	268,0	281,3	301,0	317,9
Ди-(хлорэтиловый) эфир	291,1	301,7	317,1	329,8	343,5	363,5	380,3	398,7	425,9	449,1
1,2-Дихлортрихлорсилан	—	—	314,9	328,0	342,1	362,9	380,3	399,5	428,0	452,5
Дихлорэтилфенилсилан	315,4	327,4	344,8	359,2	374,8	397,7	417,0	438,2	469,9	497,0
Ди-(2-хлорэтокси)-метан	320,5	331,8	348,2	361,6	376,1	397,2	414,8	434,1	462,4	486,4
Дихлорэтоксиметилсилан	235,3	244,2	257,2	267,9	279,6	296,7	311,1	326,9	350,5	370,8
Дихлорэтоксифенилсилан	319,3	330,9	347,7	361,6	376,6	398,6	416,9	437,0	466,8	492,2
Дициан	174,9	180,4	188,1	194,4	201,2	210,8	218,8	227,4	239,8	250,2
Диэтиламин	—	—	226,1	235,7	246,0	261,2	274,1	288,2	309,3	327,4
Диэтилацеталь	245,5	254,2	266,7	277,1	288,2	304,4	317,9	332,7	354,4	372,9
Диэтилдиоксисукцинат	337,5	349,0	365,6	379,3	394,0	415,2	432,9	452,1	480,4	504,2
Диэтилдифторсилан	212,9	220,7	231,9	241,2	251,2	265,8	278,1	291,5	311,4	328,4
Диэтилдихлорсилан	—	—	276,1	287,9	300,7	319,4	335,3	352,8	379,0	401,5
Диэтиленгликоль	360,3	371,7	387,9	401,1	415,3	435,6	452,4	470,5	496,8	518,7
Диэтиленгликоль, бутиловый эфир	334,6	345,9	362,1	375,4	389,7	410,4	427,5	446,2	473,5	496,5

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Диэтиленгликоль, этиловый эфир	313,2	324.2	340,1	353,1	367,3	387,7	404.8	423,5	450,9	474,2
Диэтиленгликоль-бис-хлорацетат	417,3	429,8	447,4	461,8	477,1	499,0	516,9	536,2	564,0	587,0
Диэтилизосукцинат	307,2	318,3	334,4	347,6	361,9	382,8	400,3	419,4	447,7	471,8
Диэтилкарбонат	258,2	267,5	280,9	292,0	304,0	321,5	336,1	352,1	375,7	395,8
Диэтилмалат	347,7	359,9	377,4	391,7	407,3	429,8	448,6	469,0	499,2	524,6
Диэтилмалеинат	324,6	336,2	353,0	366,8	381,8	403,6	421,8	441,7	471,1	496,0
Диэтилмалонат	308,4	319,5	335,4	348,6	362,8	383,5	400,8	419,7	447,7	471,4
Диэтиловый эфир	195,3	202,7	213,3	222,0	231,5	245,4	257,1	270,0	289,1	305,4
Диэтилоксалат	315,2	325,3	339,7	351,4	364,1	382,2	397,2	413,3	436,9	456,5
Диэтилселенид	242,9	252,0	265,0	275,8	287,5	304,6	319,0	334,7	358,2	378,1
Диэтилсукцинат	322,5	333,8	350,1	363,6	378,1	399,1	416,7	435,8	464,0	487,9
Диэтилсульфат	314,3	325,6	341,7	355,1	369,5	390,4	407,9	427,0	455,3	479,2
Диэтилсульфид	229,7	238,4	250,8	261,1	272,3	288,6	302,3	317,4	339,9	359,0
Диэтилсульфит	277,4	287,6	302,3	314,4	327,6	346,8	362,9	380,5	406,7	429,0
Диэтил-*d*-тартат	369,2	381,9	400,0	414,9	430,9	454,1	473,4	494,4	525,2	551,1
Диэтил-*dl*-тартат	367,4	380,2	398,4	413,4	429,6	453,0	472,6	493,8	525,0	551,4
Диэтилфумарат	320,7	332,2	348,7	362,4	377,1	398,6	416,5	436,2	465,1	489,7
Диэтилцинк	245,9	255,3	268,9	280,2	292,5	310,6	325,7	342,5	367,4	388,9
Диэтоксидиметилсилан	249,0	258,1	271,2	281,9	293,6	310,6	324,9	340,4	363,5	383,2
1,3-Диэтокситетраметил-силоксан	282,8	292,9	307,3	319,3	332,2	351,0	366,6	383,8	409,0	430,5
1,2-Диэтоксиэтан	234,7	244,4	258,5	270,3	283,2	302,3	318,5	336,6	363,9	387,7
Изоамилацетат	267,9	277,7	291,7	303,4	316,0	334,4	349,7	366,6	391,6	412,8
Изоамилнитрат	272,9	282,7	296,9	308,5	321,2	339,6	354,9	371,7	396,6	417,7
Изоамиловый спирт	278,5	287,2	299,7	309,9	320,7	336,4	349,2	363,1	383,2	400,0
Изоамилформиат	251,1	260,6	274,4	285,8	298,1	316,2	331,5	348,2	373,2	394,6
Изобутиламин	218,8	226,9	238,6	248,2	258,7	273,9	286,7	300,8	321,6	339,3
Изобутилацетат	247,3	256,7	270,2	281,5	293,7	311,5	326,5	343,1	367,7	388,8
Изобутилбутират	273,1	283,4	298,3	310,6	324,0	343,6	360,0	378,1	405,1	428,1
Изобутилдихлорацетат	295,8	306,6	322,1	334,8	348,7	368,8	385,7	404,2	431,5	454,7
Изобутилизобутират	272,3	282,2	296,4	308,1	320,8	339,3	354,7	371,7	396,7	418,0
Изобутилкарбамат	—	335,8	351,2	363,8	377,4	397,1	413,3	431,0	456,7	478,4
Изобутиловый спирт	260,0	268,5	280,6	290,5	301,1	316,3	328,9	342,6	362,5	379,2
Изобутилпропионат	266,0	275,6	289,5	300,8	313,2	331,1	346,1	362,5	386,8	407,4
Изобутилформиат	236,3	245,1	257,9	268,4	279,9	296,7	310,7	326,2	349,2	368,8
Изобутилхлорид	215,3	223,5	235,3	245,1	255,7	271,3	284,4	298,9	320,4	338,8
Изовалериановая кислота	302,9	313,0	327,4	339,2	352,0	370,3	385,5	402,0	426,1	446,3
Изокапролактон	305,7	317,2	333,7	347,4	362,3	384,0	402,3	422,4	452,2	477,7
Изокапроновая кислота	327,8	338,0	352,6	364,5	377,2	395,4	410,4	426,6	450,1	469,6
Изомасляная кислота	283,7	293,6	307,6	319,2	331,7	349,8	364,8	381,2	405,3	425,6
Изопрен	189,9	197,3	207,9	216,8	226,5	240,7	252,7	266,0	285,8	302,9
Изопропилацетат	230,7	239,3	251,7	262,0	273,2	289,5	303,1	318,2	340,5	359,5
Изопропилизобутират	252,0	261,3	274,7	285,7	297,7	315,2	329,9	346,0	369,9	390,2
Изопропиллевулинат	315,1	326,2	342,2	355,4	369,7	390,4	407,6	426,5	454,3	477,8
Изопропилформиат	217,2	225,4	237,1	246,8	257,4	272,8	285,7	300,0	321,1	339,2
Изопропилхлорацетат	272,3	282,3	296,7	308,6	321,5	340,4	356,1	373,5	399,1	421,0
Иодбензол	291,1	302,2	318,2	331,4	345,8	366,9	384,6	404,2	433,3	458,2
1-Иод-3-метилбутан	265,4	275,5	290,1	302,2	315,3	334,6	350,7	368,6	395,1	417,9
1-Иод-2-метилпропан	251,7	261,1	274,6	285,7	297,9	315,5	330,4	346,7	370,9	391,5
1-Иодоктан	312,3	324,4	341,9	356,4	372,2	395,4	414,9	436,5	468,7	496,4
1-Иодпропан	233,0	242,1	255,3	266,3	278,2	295,8	310,6	327,0	351,6	372,8
2-Иодпропан	225,5	234,3	246,9	257,5	269,0	285,8	300,1	315,8	339,3	359,5
2-Иодтолуол	304,6	316,2	333,1	347,1	362,3	384,6	403,4	424,1	454,9	481,4
Каприловая кислота	355,5	366,2	381,4	393,7	406,8	425,6	441,1	457,6	481,6	501,4
Каприловый альдегид	342,9	350,7	361,6	370,3	379,4	392,1	402,4	413,2	428,3	440,6
Каприлонитрил	308,4	319,5	335,5	348,7	362,9	383,7	401,0	420,0	448,1	471,9
Капронитрил	276,9	287,4	302,5	315,0	328,6	348,5	365,2	383,7	411,1	434,6
Капроновая кислота	152,8	159,1	168,2	175,8	184,1	196,4	206,9	218,5	236,0	251,2
Карбонилселенид	305,8	316,4	331,7	344,3	357,9	377,6	394,0	411,9	438,1	460,4
2-Крезол	318,0	328,6	343,9	356,4	369,9	389,3	405,4	422,9	448,5	470,1
3-Крезол	319,3	329,9	345,1	357,6	370,9	390,2	406,2	423,6	448,9	470,2

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
4-Крезол	—	—	335,4	347,5	360,6	379,3	394,9	411,7	436,4	457,1
α-Кротоновая кислота	301,4	311,4	325,6	337,3	349,9	367,9	382,9	399,1	422,8	442,7
β-Кротоновая кислота	238,8	248,0	261,4	272,5	284,5	302,2	317,2	333,7	358,3	379,4
цис-Кротононитрил	248,7	258,2	272,0	283,4	295,8	314,0	329,3	346,2	371,3	393,0
транс-Кротононитрил	323,5	334,9	351,3	364,8	379,4	400,5	418,2	437,5	465,9	490,0
2,3-Ксиленол	319,1	330,1	345,9	358,9	372,9	393,2	410,1	428,5	455,5	478,2
2,4-Ксиленол	333,7	345,0	361,3	374,7	389,0	409,8	427,1	445,9	473,5	496,7
3,5-Ксиленол	329,7	340,9	357,0	370,2	384,4	404,9	422,0	440,6	467,8	490,7
2,4-Ксилидин	319,9	331,0	347,1	360,2	374,5	395,1	412,3	431,1	458,6	482,0
2,6-Ксилидин	311,4	323,1	340,0	354,0	369,1	391,3	410,0	430,5	460,9	487,0
2-Ксилол	263,9	273,9	288,2	300,1	313,1	332,0	347,9	365,4	391,4	413,7
3-Ксилол	260,9	270,7	284,9	296,6	309,3	327,9	343,6	360,8	386,3	408,2
4-Ксилол	259,7	269,5	283,7	295,4	308,2	326,8	342,5	359,7	385,4	407,4
Левулиновая кислота	370,0	380,9	396,3	408,8	422,1	441,2	456,7	473,4	497,5	517,4
Левулиновый альдегид	295,8	306,7	322,4	335,4	349,5	370,1	387,4	406,3	434,4	458,4
Масляная кислота	293,6	303,5	317,7	329,3	341,8	359,8	374,8	391,1	414,9	435,0
Мезитила окись	259,3	268,8	282,5	293,8	306,1	324,0	339,0	355,5	379,8	400,6
Меркаптоуксусная кислота	328,2	339.4	355.3	368,4	382,5	402,9	419,8	—	—	—
Метакрилнитрил	224,4	233,2	246,0	256,7	268,3	285,5	299,9	315,9	339,9	360,7
Метакриловая кислота	293,1	302,9	316,9	328,3	340,7	358,5	373,2	389,2	412,6	432,3
Метан	66,2	69,0	73,1	76,5	80,3	85,9	90,7	96,0	104,1	111,2
Метанол	225,6	233,3	244,4	253,5	263,2	277,4	289,2	302,0	320,7	336,5
Метилакрилат	225,5	233,9	245,9	255,9	266,7	282,4	295,6	310,1	331,6	350,0
Метиламин	174,6	180,8	189,7	197,1	205,0	216,6	226,2	236,8	252,2	265,4
N-Метиланилин	303,5	314,5	330,3	343,4	357,5	378,1	395,3	414,1	441,9	465,6
Метилантранилат	344,1	356,9	375,5	390,8	407,5	431,8	452,2	474,7	508,0	536,5
Метилацетат	212,0	219,9	231,1	240,4	250,5	265,2	277,6	291,1	311,2	328,3
Метилацетилен	158,8	164,7	173,3	180,4	188,1	199,4	208,8	219,2	234,7	247,9
α-Метилбензиловый спирт	316,5	327,4	343,0	355,9	369,7	389,7	406,4	424,5	451,2	473,6
Метилбензоат	305,3	316,3	332,2	345,2	359,4	380,0	397,2	416,1	443,9	467,6
2-Метилбензотиазол	338,0	349,2	365,2	378,3	392,4	412,7	429,5	447,8	474,5	496,9
Метилбромид	173,4	180,1	189,7	197,7	206,4	219,2	230,0	241,8	259,6	274,8
2-Метилбутан	186,9	194,1	204,6	213,3	222,8	236,8	248,5	261,5	280,9	297,6
3-Метил-2-бутанон	249,0	257,0	268,3	277,6	287,5	301,8	313,5	326,2	344,7	360,2
2-Метил-1-бутен	180,0	187,2	197,6	206,3	215,8	229,8	241,6	254,8	274,5	291,6
2-Метил-2-бутен	194,5	202,0	213,0	222,0	231,9	246,4	258,6	272,1	292,2	309,6
Метилбутират	242,2	251,0	263,7	274,1	285,5	301,9	315,7	330,8	353,2	372,2
2-Метилгексан	228,5	237,2	249,8	260,2	271,6	288,2	302,2	317,6	340,6	360,3
3-Метилгексан	229,3	238,0	250,6	261,0	272,4	289,0	303,0	318,4	341,3	360,9
2-Метилгептан	246,8	256,2	269,6	280,7	292,8	310,5	325,4	341,7	366,1	386,9
3-Метилгептан	248,3	257,5	270,9	282,0	294,1	311,7	326,5	342,7	366,8	387,5
4-Метилгептан	247,3	256,6	270,0	281,1	293,2	310,8	325,7	342,0	366,2	387,0
2-Метил-2-гептен	252,2	261,6	275,1	286,4	298,6	316,4	331,3	347,7	372,1	392,9
6-Метил-3-гептен-2-ол	309,5	319,3	333,3	344,8	357,0	374,6	389,1	404,8	427,6	446,6
6-Метил-5-гептен-2-ол	310,4	320,2	334,2	345,6	357,8	375,4	389,9	405,5	428,2	447,1
Метилгликолат	277,8	287,7	301,9	313,6	326,2	344,6	359,9	376,6	401,3	422,2
α-Метилглутаровый ангидрид	360,4	373,5	392,2	407,7	424,5	449,0	469,4	491,8	524,9	553,0
2-Метилдисилазан	193,0	200,3	211,0	219,9	229,5	243,6	255,5	268,6	288,1	304,8
Метилдихлорацетат	271,0	280,7	294,7	306,2	318,7	336,8	351,9	368,5	392,9	413,7
Метилдихлорсилан	—	—	211,7	221,2	231,7	247,3	260,4	275,1	297,2	316,5
Метилизобутират	234,9	243,5	255,9	266,1	277,2	293,4	307,0	321,8	343,9	362,6
Метилизовалерат	249,2	258,4	271,7	282,7	294,7	312,1	326,7	342,7	366,4	386,7
Метилизотиоцианат	236,3	246,3	260,8	273,0	286,4	306,2	323,2	342,1	370,8	395,9
Метилиодид	—	203,1	214,3	223,6	233,7	248,6	261,2	275,2	296,1	314,2
Метилкапронат	273,8	293,8	298,2	310,2	323,1	341,9	357,6	374,9	400,5	422,3
Метиллевулинат	307,4	318,4	334,2	347,2	361,3	381,8	398,9	417,6	445,2	468,6
Метилмеркаптан	179,2	185,8	195,3	203,2	211,8	224,2	234,7	246,1	263,2	277,7
Метилметакрилат	237,4	246,3	259,3	270,0	281,6	298,6	312,9	328,6	352,0	372,0
2-Метилпентан	208,6	216,5	228,1	237,7	248,2	263,5	276,4	290,6	311,8	330,0
3-Метилпентан	210,0	218,0	229,7	239,5	250,0	265,6	278,6	293,1	314,6	333,1
2-Метил-1-пентанол	283,4	292,9	306,5	317,7	329,6	346,9	361,3	376,9	399,6	418,8

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
2-Метил-2-пентанол	264,1	273,0	285,7	296,2	307,4	323,6	337,0	351,6	373,0	391,0
2-Метил-4-пентанол	268,2	277,5	290,8	301,8	313,6	330,8	345,0	360,6	383,4	402,7
4-Метил-2-пентанон	267,6	276,3	288,7	298,8	309,7	325,4	338,3	352,3	372,7	389,7
2-Метилпропан	160,7	167,1	176,3	184,1	192,5	204,8	215,3	226,9	244,3	259,4
2-Метилпропен	162,9	169,4	179,0	187,0	195,7	208,6	219,6	231,7	250,0	265,9
Метилпропиловый эфир	197,4	204,8	215,6	224,6	234,3	248,5	260,5	273,6	293,2	310,0
Метилпропионат	227,1	235,4	247,4	257,3	268,0	283,6	296,7	311,1	332,3	350,4
2-Метилпропионил-бромид	281,1	291,5	306,3	318,6	331,9	351,3	367,6	385,4	411,9	434,4
Метилсалицилат	320,5	332,1	348,7	362,5	377,4	399,0	417,1	437,0	466,3	491,2
Метилсилан	131,8	137,0	144,7	151,1	158,1	168,4	177,1	186,7	201,3	213,8
2-Метилтиофен	241,0	250,3	263,7	274,9	287,0	304,9	319,9	336,5	361,3	382,6
2,3-Метилтиофен	244,0	253,3	266,7	277,8	290,0	307,7	322,6	339,1	363,6	384,7
Метилтиоцианат	254,0	263,0	278,0	289,8	302,6	321,5	337,3	354,9	381,0	403,5
Метилтрихлорсилан	—	—	231,0	241,0	251,8	267,7	281,2	296,1	318,3	337,5
Метилуретан	294,5	304,6	319,2	331,2	344,2	362,9	378,5	395,5	420,5	441,5
Метилформиат	195,2	202,5	212,9	221,5	230,8	244,5	255,9	268,4	287,0	302,9
Метилфторид	122,9	127,5	134,1	139,7	145,7	154,4	161,8	169,9	182,0	192,3
Метилхлорацетат	265,0	274,3	287,5	298,4	310,2	327,3	341,5	357,0	379,7	399,0
Метилхлорид	159,8	165,5	173,8	180,6	188,0	198,7	207,7	217,5	232,0	244,3
Метилциклогексан	233,0	242,0	255,0	265,8	277,6	294,9	309,5	325,5	349,5	370,2
Метилциклопентан	215,7	224,0	236,0	246,0	256,8	272,6	286,0	300,7	322,7	341,6
Метилциклопропан	173,4	180,0	189,7	197,7	206,4	219,2	230,0	241,9	259,7	275,0
2-Метил-3-этилпентан	244,1	253,4	266,9	278,1	290,3	308,1	323,2	339,7	364,4	385,7
3-Метил-3-этилпентан	244,1	253,5	267,1	278,5	290,8	308,9	324,2	341,0	366,2	387,9
2-Метоксианилин	328,8	340,1	356,1	369,3	383,6	404,1	421,2	439,8	467,1	490,0
2-Метоксифенол	320,3	331,2	346,8	359,6	373,4	393,4	409,9	428,0	454,4	476,6
2-Метоксиэтанол	255,8	265,2	278,8	290,0	302,1	319,8	334,6	350,9	375,0	395,6
Метоуксусная кислота	320,4	331,3	346,9	359,7	373,5	393,5	410,1	428,1	454,5	476,7
Муравьиная кислота	242,8	251,3	263,4	273,5	284,3	300,0	313,0	327,3	348,3	366,0
2-Нитроанилин	371,0	383,8	402,3	417,4	433,8	457,6	477,2	498,7	530,3	557,0
3-Нитроанилин	386,0	399,3	418,4	434,1	451,0	475,4	495,8	517,9	550,4	577,9
4-Нитроанилин	410,0	423,9	443,9	460,2	477,9	503,4	524,6	547,6	581,3	609,7
2-Нитробензальдегид	352,8	365,7	384,3	399,6	416,2	440,5	460,7	483,0	515,9	543,9
3-Нитробензальдегид	362,9	375,7	394,1	409,2	425,5	449,2	469,0	490,5	522,3	549,2
Нитробензол	310,8	322,1	338,5	352,0	366,6	388,0	405,8	425,4	454,4	479,1
Нитроглицерин	393,3	409,4	432,8	452,5	473,9	505,7	—	—	—	—
4-Нитро-1,3-ксилол	332,2	344,4	361,9	376,5	392,2	415,1	434,3	455,4	486,6	513,2
Нитрометан	239,4	248,2	261,0	271,6	283,1	299,8	313,9	329,3	352,2	371,7
1-Нитропропан	258,3	267,9	281,8	293,2	305,7	323,9	339,2	356,0	380,9	402,2
2-Нитропропан	249,6	259,0	272,6	283,9	296,2	314,1	329,1	345,7	370,3	391,4
2-Нитротиофен	315,5	327,4	344,7	359,0	374,6	397,4	416,5	437,6	469,0	495,9
2-Нитротолуол	318,0	329,8	346,7	360,8	376,0	398,2	416,8	437,2	467,5	493,4
3-Нитротолуол	318,2	330,4	348,1	362,8	378,7	402,1	421,9	443,6	476,1	504,0
4-Нитротолуол	321,3	333,8	351,8	366,7	383,0	406,9	427,0	449,3	482,5	511,1
2-Нитрофенилацетат	368,2	379,6	395,8	409,0	423,1	443,4	460,0	478,0	503,9	525,5
2-Нитрофенол	316,5	328,0	344,5	358,1	372,8	394,2	412,1	431,7	460,7	485,4
Нитроэтан	247,4	256,6	269,8	280,8	292,7	310,1	324,7	340,8	364,6	384,9
4-Оксибензальдегид	387,5	400,9	420,0	435,8	452,7	477,3	497,7	519,9	552,5	580,1
α-Оксибутиронитрил	309,9	320,0	334,3	346,1	358,6	376,7	391,7	407,9	431,5	451,2
α-Оксиизомасляная кислота	341,2	351,6	366,3	378,3	391,2	409,5	424,6	440,8	464,2	483,6
4-Окси-3-метил-2-бутанон	312,4	322,6	337,2	349,1	361,9	380,4	395,6	412,1	436,2	456,4
4-Окси-4-метил-2-пентанон	290,1	300,4	315,0	327,1	340,1	359,0	374,8	392,0	417,3	438,8
3-Оксипропионитрил	326,9	338,4	355,0	368,6	383,4	404,8	422,6	442,1	470,9	495,2
Октаметилтрисилоксан	275,3	285,2	299,5	311,2	323,9	342,4	357,9	374,8	399,8	421,0
Октаметилциклотетрасилоксан	289,7	300,1	315,0	327,2	340,5	359,8	375,9	393,5	419,4	441,5
Октан	253,5	262,9	276,5	287,8	300,0	317,9	332,9	349,3	373,7	394,6
1-Октанол	320,1	330,4	345,0	356,9	369,6	388,0	403,1	419,5	443,3	463,1
2-Октанол	300,8	311,1	325,9	338,0	351,2	370,1	385,9	403,0	428,2	449,5
2-Октанон	290,9	301,3	316,3	328,7	342,1	361,6	377,8	395,6	421,9	444,3

Вещество	Давление пара, кПа									
	0.1	0.2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Параформальдегид	259,3	268,6	281,9	292,8	304,6	321,8	336,1	351,8	374,9	394,6
1,3-Пентадиен	197,0	204,6	215,6	224,7	234,7	249,2	261,5	275,1	295,3	312,7
1,4-Пентадиен	186,3	193,5	204,0	212,7	222,1	236,0	247,7	260,7	280,0	296,6
Пентан	191,8	199,3	210,2	219,2	229,1	243,5	255,7	269,2	289,4	306,8
2-Пентанол	270,3	278,8	291,0	300,9	311,5	326,8	339,4	353,0	372,7	389,1
2-Пентанон	256,9	265,3	277,2	286,9	297,3	312,3	324,7	338,1	357,7	374,1
3-Пентанон	256,1	264,4	276,3	286,1	296,5	311,6	324,0	337,5	357,1	373,6
2, 3, 4-Пентатриол	424,0	436,9	455,3	470,3	486,3	509,2	528,0	548,2	577,5	601,8
Пентахлорбензол	365,8	378,4	396,4	411,3	427,2	450,4	469,6	490,6	521,4	547,3
Пентахлорфенол	—	—	—	441,8	458,4	482,5	502,5	524,1	555,9	582,5
Пентахлорэтан	268,8	279,4	294,7	307,5	321,4	341,9	359,2	378,3	407,0	431,7
Пентахлорэтилбензол	363,4	377,1	397,0	413,4	431,3	457,5	479,5	503,7	539,7	570,6
1-Пентен	188,7	196,0	206,6	215,4	225,0	239,1	251,0	264,1	283,7	300,6
2-Пиколин	257,9	267,4	281,2	292,6	304,9	322,9	338,0	354,6	379,2	400,3
Пимелиновая кислота	430,7	444,0	462,9	478,3	494,7	518,3	537,6	558,5	588,7	613,8
Пиперидин	—	248,0	261,2	272,1	284,0	301,5	316,2	332,4	356,5	377,2
Пиридин	248,9	258,1	271,3	282,2	294,1	311,3	325,8	341,7	365,2	385,3
Пировиноградный ангидрид	337,0	349,2	366,8	381,3	397,0	419,9	439,0	460,0	490,9	517,3
Пирогаллол	—	398,1	417,4	433,3	450,5	475,4	496,1	518,8	552,1	580,3
Пирокатехин	—	353,3	370,7	384,9	400,3	422,7	441,4	461,8	491,8	517,3
Пробковая кислота	439,3	452,4	470,9	486,0	502,1	525,1	543,9	564,1	593,2	617,3
Пропан	141,8	147,4	155,6	162,4	169,9	180,8	190,1	200,4	215,8	229,2
1,2-Пропандиол	313,8	324,1	338,9	351,0	363,9	382,6	398,1	414,9	439,4	459,9
1,3-Пропандиол	327,7	338,9	354,8	367,8	381,9	402,2	419,0	437,4	464,2	486,9
1-Пропанол	254,3	262,5	274,2	283,7	294,0	308,7	320,9	334,1	353,3	369,3
2-Пропанол	243,3	251,2	262,5	271,7	281,6	295,8	307,5	320,3	338,8	354,3
Пропиламин	204,9	212,5	223,5	232,6	242,5	256,9	269,0	282,3	302,1	318,9
Пропилацетат	242,3	251,1	263,7	274,1	285,4	301,9	315,6	330,7	353,0	371,9
Пропилбутират	266,3	276,2	290,4	302,2	314,9	333,5	349,2	366,3	391,7	413,5
Пропилен	137,8	143,3	151,4	158,1	165,4	176,3	185,5	195,6	211,0	224,3
Пропилена окись	194,5	201,8	212,5	221,3	230,9	244,9	256,6	269,6	288,9	305,4
Пропилизовалерат	276,2	286,3	300,9	313,0	326,1	345,2	361,2	378,8	404,8	427,0
Пропилкарбамат	320,3	330,7	345,5	357,6	370,6	389,3	404,8	421,5	445,9	466,2
Пропиллевулинат	326,1	337,5	353,8	367,3	381,8	402,8	420,4	439,5	467,6	491,4
Пропилмеркаптан	213,0	221,3	233,2	243,1	253,9	269,7	283,0	297,7	319,7	338,6
Пропилпропионат	254,0	263,3	276,7	287,9	299,9	317,5	332,2	348,3	372,3	392,7
Пропилформиат	226,0	234,4	246,5	256,6	267,5	283,5	296,9	311,6	333,5	352,2
Пропилхлоргликсилат	277,1	286,7	300,4	311,7	323,9	341,5	356,1	372,1	395,6	415,4
Пропионамид	333,5	344,3	359,8	372,5	386,1	405,7	421,9	439,4	465,0	486,4
Пропионитрил	233,4	242,3	255,2	265,9	277,5	294,4	308,7	324,5	347,9	368,1
Пропионовая кислота	273,5	283,1	296,8	308,2	320,4	338,1	352,9	369,0	392,7	412,7
Пропионовый ангидрид	288,5	298,7	313,4	325,6	338,7	357,7	373,6	391,0	416,5	438,2
Резорцион	375,5	387,7	405,1	419,4	434,7	456,8	475,0	494,7	523,5	547,6
Салициловая кислота	377,2	387,9	403,0	415,2	428,2	446,7	461,7	477,9	501,0	520,0
Салициловый альдегид	300,5	311,7	327,8	341,2	355,7	376,8	394,6	414,1	443,0	467,8
Селенофен	228,9	238,6	252,6	264,4	277,3	296,5	312,9	331,2	358,9	383,2
Сероселенуглерод	221,4	230,1	242,8	253,3	264,7	281,6	295,8	311,6	335,2	355,6
Сероуглерод	196,3	204,1	215,4	224,9	235,2	250,3	263,2	277,4	298,8	317,2
Синильная кислота	198,2	204,9	214,4	222,2	230,7	242,8	252,9	263,9	280,0	293,5
Сукцинамид	380,6	393,1	411,0	425,7	441,4	464,1	482,9	503,2	532,9	557,8
Сукцинхлорид	306,9	317,7	333,2	346,0	359,7	379,7	396,4	414,6	441,4	464,0
Стирол	261,8	271,9	286,6	298,8	312,2	331,7	348,1	366,3	393,5	416,9
1, 1, 1, 2-Тетрабромэтан	326,0	336,4	351,3	363,4	376,4	395,1	410,5	427,2	451,5	471,7
1, 1, 2, 2-Тетрабромэтан	332,5	344,7	362,4	376,9	392,7	415,7	435,0	456,2	487,6	514,3
Тетраметилбор	210,6	219,0	231,2	241,4	252,5	268,8	282,6	297,9	320,9	340,8
2, 2, 3, 3-Тетраметилбутан	251,1	259,7	272,1	282,3	293,3	309,2	322,4	336,8	357,9	375,8
Тетраметилолово	217,5	226,0	238,4	248,7	259,9	276,3	290,2	305,6	328,7	348,5
Тетраметилпиперазин	290,7	301,5	317,0	329,8	343,6	363,9	380,9	399,5	427,1	450,7
Тетраметилсвинец	239,1	248,3	261,7	272,8	285,0	302,7	317,7	334,3	359,1	380,3
Тетраметилсилан	185,5	192,8	203,3	212,1	221,7	235,8	247,7	260,9	280,7	297,7
Тетранитрометан	—	—	278,5	289,9	302,3	320,3	335,5	352,2	377,0	398,2
Тетрахлорамин	340,6	348,2	358,7	367,1	375,9	388,2	398,1	408,4	423,0	434,8
1, 2, 3, 4-Тетрахлорбензол	335,5	348,0	366,1	381,0	397,3	421,0	440,9	462,7	495,2	523,0

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
1,2,3,5-Тетрахлорбензол	325,1	337,7	356,0	371,2	387,7	412,0	432,5	455,2	489,1	518,2
1,2,4,5-Тетрахлорбензол	—	—	—	—	394,1	417,5	437,1	458,7	490,8	518,2
1,1,2,2-Тетрахлор-1,2-дифторэтан	231,5	240,3	253,0	263,5	274,9	291,7	305,8	321,3	344,4	364,2
3,4,5,6-Тетрахлор-1,2-ксилол	361,2	373,8	391,9	406,8	422,9	446,2	465,6	486,7	517,9	544,2
Тетрахлорсилан	—	—	223,7	233,5	244,2	259,9	273,2	287,9	310,0	329,1
2-α, α, α-Тетрахлортолуол	336,8	349,8	368,8	384,5	401,6	426,7	447,9	471,3	506,3	536,5
2,3,4,6-Тетрахлорфенол	367,1	379,6	397,5	412,2	428,0	450,9	469,9	490,6	520,8	546,4
1,1,1,2-Тетрахлорэтан	251,9	261,6	275,8	287,5	300,3	319,0	334,8	352,2	378,3	400,7
1,1,2,2-Тетрахлорэтан	264,0	274,0	288,6	300,7	313,9	333,2	349,4	367,3	393,9	416,8
1,2,3,5-Тетрахлор-4-этилбензол	344,7	357,8	376,6	392,3	409,3	434,2	455,2	478,3	512,6	542,1
Тетрахлорэтилен	248,0	257,5	271,1	282,5	294,8	312,9	328,1	344,9	369,9	391,3
Тетраэтилдистибин	363,4	377,9	399,1	416,8	436,1	464,5	488,6	515,3	555,5	590,3
Тетраэтиленгликоль	421,8	433,7	450,5	464,1	478,5	499,0	515,7	533,6	559,3	580,4
Тетраэтиленгликольхлоргидрин	378,1	390,5	408,3	422,8	438,4	460,9	479,6	499,8	529,2	553,9
Тетраэтилсвинец	305,8	316,1	330,8	342,9	355,9	374,7	390,3	407,3	432,1	453,0
Тетраэтилсилан	266,8	277,1	292,0	304,4	317,8	337,6	354,2	372,6	400,0	423,6
Тетраэтоксисилан	282,8	293,2	308,2	320,7	334,1	353,8	370,3	388,4	415,2	438,1
Тиглиновый альдегид	243,9	253,3	267,0	278,4	290,7	308,9	324,2	341,1	366,4	388,1
2,2-Тиодиэтанол	305,9	326,8	359,1	388,2	422,5	478,2	531,2	—	—	—
Тиофен	227,4	235,9	248,0	258,1	269,1	285,0	298,4	313,2	335,0	353,7
4-Толилгидразин	292,6	303,4	319,0	331,9	345,9	366,3	383,4	402,2	430,1	453,9
2-Толилизоцианид	310,5	321,3	336,9	349,7	363,5	383,6	400,3	418,5	445,3	468,0
2-Толуидин	308,7	320,0	336,2	349,6	364,1	385,2	402,9	422,2	450,9	475,3
3-Толуидин	309,5	320,5	336,3	349,4	363,4	383,9	401,0	419,6	447,1	470,5
4-Толуидин	304,2	315,6	332,1	345,7	360,6	382,2	400,4	420,5	450,2	475,7
4-Толунитрил	309,4	321,2	338,2	352,4	367,8	390,3	409,2	430,1	461,3	488,0
Толуол	241,5	250,6	263,9	274,9	286,9	304,4	319,1	335,3	359,5	380,2
Толуол-2,4-диамин	373,4	385,9	403,7	418,4	434,2	457,0	475,8	496,3	526,3	551,5
Трибромацетальдегид	286,7	297,4	312,7	325,4	339,2	359,3	376,2	394,7	422,2	445,7
1,1,2-Трибромбутан	312,3	324,0	340,8	354,8	370,0	392,2	410,8	431,3	461,7	487,7
1,2,2-Трибромбутан	308,2	319,8	336,7	350,6	365,8	388,0	406,6	427,1	457,7	483,9
2,2,3-Трибромбутан	305,6	317,0	333,5	347,2	362,0	383,7	401,8	421,8	451,5	476,9
Трибромметан	—	274,4	289,3	301,8	315,3	335,2	352,0	370,6	398,4	422,3
1,2,3-Трибромпропан	314,2	326,0	343,0	357,0	372,3	394,7	413,4	434,1	464,8	491,0
1,1,2-Трибромэтан	299,3	310,1	325,7	338,5	352,4	372,6	389,5	408,0	435,3	458,5
Триметиламин	172,5	179,1	188,8	196,8	205,5	218,3	229,1	241,0	258,7	274,0
Триметилбор	153,7	160,0	169,2	176,9	185,3	197,7	208,2	220,0	237,7	253,1
2,2,3-Триметилбутан	—	—	238,4	248,9	260,4	277,3	291,7	307,6	331,4	352,1
Триметилгаллий	208,1	216,0	227,6	237,1	247,5	262,7	275,6	289,7	310,8	328,9
Триметилдиборан	196,1	203,9	215,3	224,8	235,2	250,4	263,3	277,7	299,2	317,8
2,2-3-Триметилпентан	239,0	248,2	261,6	272,7	284,7	302,4	317,3	333,8	358,4	379,5
2,2,4-Триметилпентан	232,0	241,0	253,9	264,7	276,5	293,7	308,2	324,3	348,2	368,8
2,3,4-Триметилпентан	241,9	251,2	264,6	275,7	287,9	305,7	320,6	337,2	361,8	383,0
2,2,4-Триметил-2-пентанол	283,0	291,9	304,5	314,9	325,9	341,8	354,8	368,9	389,4	406,4
Триметилпропилолово	255,1	264,7	278,7	290,2	302,8	321,1	336,6	353,6	378,9	400,6
Триметилпропилсилан	222,7	231,6	244,5	255,2	266,9	284,2	298,8	315,0	339,3	360,3
Триметилфосфат	294,0	305,2	321,4	334,9	349,6	371,0	389,1	409,0	438,6	464,1
Триметилхлорсилан	—	—	223,7	233,5	244,2	260,0	273,3	288,1	310,3	329,5
Триметилянтарный ангидрид	320,2	332,3	349,7	364,1	379,8	402,7	422,0	443,2	474,7	501,7
α, α, α-Трифтортолуол	236,5	245,5	258,4	269,2	280,9	298,1	312,5	328,4	352,1	372,5
Трифторфенилсилан	237,6	246,4	259,1	269,6	280,9	297,5	311,4	326,6	349,3	368,6
2,4,6-Трихлоранилин	401,9	412,2	426,5	438,1	450,3	467,5	481,4	496,1	517,1	534,1
Трихлорацетальдегид	231,2	240,1	253,1	263,9	275,7	292,9	307,4	323,5	347,5	368,1
Трихлорацетилбромид	260,5	270,5	285,1	297,1	310,2	329,4	345,6	363,5	390,1	413,1
1, 2, 3-Трихлорбензол	308,2	320,2	337,5	351,9	367,6	390,6	410,0	431,5	463,6	491,2
1, 2, 4-Трихлорбензол	305,6	317,4	334,3	348,4	363,8	386,2	405,1	426,0	457,2	483,9
1,3,5-Трихлорбензол	—	313,4	330,3	344,3	359,6	382,0	400,9	421,8	453,0	479,8
1, 2, 3-Трихлорбутан	268,0	278,9	294,7	308,0	322,5	343,8	362,0	382,2	412,6	439,0

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Трихлоризопропилсилан	244,1	253,6	267,2	278,5	290,9	309,0	324,2	341,0	366,2	387,8
Трихлорметан	210,9	218,9	230,4	240,0	250,4	265,5	278,3	292,3	313,2	331,1
Трихлорметилсилан	208,8	217,1	229,1	239,1	250,0	266,0	279,6	294,7	317,2	336,7
1,1,1-Трихлорпропан	239,8	248,9	262,1	273,1	285,0	302,4	317,1	333,3	357,4	378,0
1,2,3-Трихлорпропан	276,8	287,0	301,7	313,9	327,1	346,4	362,6	380,3	406,7	429,1
Трихлорсилан	—	—	206,9	215,9	225,7	240,1	252,3	265,8	286,0	303,5
α, α, α-Трихлортолуол	312,6	324,1	340,7	354,5	369,4	391,2	409,4	429,4	459,1	484,4
1,1,2-Трихлор-1,2,2-трифторэтан	201,3	209,0	220,2	229,4	239,5	254,3	266,7	280,4	300,9	318,4
Трихлоруксусная кислота	318,7	329,2	344,1	356,3	369,5	388,4	404,0	421,0	445,7	466,4
Трихлоруксусный ангидрид	324,0	335,7	352,4	366,1	381,0	402,7	420,8	440,6	469,9	494,7
Трихлорфенилсилан	300,3	311,6	328,0	341,5	356,2	377,7	395,8	415,7	445,4	470,7
2,4,5-Трихлорфенол	340,0	352,2	369,7	384,2	399,9	422,6	441,6	462,5	493,2	519,3
2,4,6-Трихлорфенол	185,0	192,2	202,5	211,1	220,5	234,3	245,9	258,7	277,8	294,2
Трихлорфторметан	216,7	225,0	237,1	247,2	258,2	274,2	287,8	302,7	325,0	344,2
1,1,1-Трихлорэтан	243,9	253,1	266,6	277,7	289,8	307,5	322,4	338,9	363,4	384,4
1,1,2-Трихлорэтан	225,5	234,1	246,6	257,0	268,3	284,9	298,9	314,3	337,2	357,0
Трихлорэтилен	240,8	249,6	262,1	272,5	283,8	300,2	313,9	328,9	351,1	369,9
Трихлорэтилсилан	236,3	245,3	258,3	269,1	280,8	298,0	312,4	328,4	352,1	372,4
Трихлорэтоксисилан	—	—	113,0	120,3	128,7	141,8	153,5	167,5	190,2	212,0
Триэтиленбор	382,0	394,2	411,4	425,5	440,5	462,2	480,0	499,3	527,3	550,6
Триэтиленгликоль	249,8	259,4	273,4	285,1	297,7	316,3	332,0	349,3	375,2	397,4
Триэтилметилсилан	275,9	287,5	304,4	318,6	334,2	357,3	377,0	398,9	432,3	461,5
Триэтилформиат	273,3	283,1	297,2	308,8	321,3	339,6	354,8	371,5	396,1	417,0
Триэтилфосфат	306,7	318,3	335,2	349,3	364,5	386,9	405,6	426,4	457,2	483,7
Триэтоксиметилсилан	338,0	349,6	366,1	379,7	394,3	415,5	433,1	452,3	480,4	504,0
Углерода диоксид	135,8	140,1	146,1	151,0	156,3	163,8	170,0	176,7	186,4	194,5
Углерода недиоксид	173,9	180,7	190,6	198,8	207,7	220,9	232,0	244,3	262,7	278,6
Углерода оксид	49,9	51,8	54,7	57,1	59,7	63,5	66,8	70,4	75,7	80,4
Углерода сероокись	138,0	143,4	151,2	157,7	164,8	175,2	184,0	193,7	208,3	220,8
Углерод подсернистый	282,4	293,2	308,9	322,0	336,2	357,0	374,5	393,9	—	—
Углерод четырехбромистый	—	—	—	—	345,3	366,8	384,8	404,7	434,5	460,0
Углерод четырехфтористый	88,3	91,9	97,3	101,7	106,7	113,9	120,1	127,0	137,4	146,6
Углерод четыреххлористый	218,8	227,3	239,5	249,6	260,6	276,8	290,4	305,4	327,8	347,1
Уксусная кислота	252,0	261,2	274,6	285,7	297,7	315,2	329,8	345,9	369,8	390,1
Уксусный ангидрид	270,1	279,6	293,3	304,7	316,9	334,6	349,4	365,6	389,4	409,6
Уретан	—	318,8	333,6	345,7	358,7	377,5	393,1	410,1	434,9	455,7
2-Фенетидин	334,2	345,7	362,1	375,7	390,3	411,4	429,0	448,2	476,3	500,0
Фенетиловый спирт	325,7	337,1	353,4	366,9	381,4	402,5	420,0	439,1	467,3	491,1
Фенетол	285,7	296,3	311,5	324,1	337,8	357,8	374,5	392,9	420,1	443,3
Фенилацетат	305,8	316,7	332,5	345,5	359,6	380,0	397,1	415,8	443,3	466,8
Фенилацетохлорид	315,5	326,7	342,9	356,2	370,6	391,6	409,0	428,1	456,3	480,2
Фенилацетонитрил	327,3	339,2	356,4	370,5	385,9	408,3	427,0	447,6	478,0	503,9
Фенилгидразин	339,3	351,2	368,4	382,6	397,9	420,1	438,6	458,8	488,5	513,7
1,3-Фенилдиамин	366,6	379,6	398,2	413,6	430,1	454,2	474,3	496,2	528,5	555,9
Фенилдихлорфосфат	333,4	345,4	362,6	376,8	392,2	414,6	433,3	453,8	484,0	509,7
Фенилизотиоцианат	315,1	326,9	343,8	357,8	373,0	395,2	413,8	434,3	464,7	490,7
Фенилизоцианат	278,0	288,5	303,6	316,2	329,8	349,7	366,5	384,9	412,3	435,7
Фенилизоцианид	279,8	290,1	305,1	317,5	331,0	350,6	367,1	385,2	412,1	435,0
Фенилмеркаптан	286,1	296,4	311,3	323,6	337,0	356,3	372,6	390,3	416,5	438,9
Фенилтрихлорсилан	—	—	327,7	341,4	356,2	377,8	396,0	416,1	446,0	471,6
Фенилуксусная кислота	364,5	376,6	394,0	408,2	423,4	445,5	463,7	483,5	512,5	536,8
2-Феноксиэтанол	345,2	357,1	374,0	387,9	402,9	424,6	442,6	462,2	491,0	515,2
Фенол	306,0	316,1	330,6	342,4	355,1	373,5	388,7	405,2	429,2	449,4
Формальдегид	—	—	174,7	182,1	190,1	201,9	211,8	222,8	239,1	253,2
Формамид	339,1	349,6	364,5	376,7	389,7	408,4	423,8	440,3	464,3	484,3
Фосген	176,8	183,6	193,3	201,4	210,2	223,0	233,8	245,8	263,5	278,8
Фталевый ангидрид	357,1	370,2	389,0	404,6	421,5	446,2	466,8	489,4	523,0	551,5
Фталид	361,7	375,0	394,3	410,2	427,5	452,7	473,8	497,0	531,4	560,7

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Фталилхлорид	353,2	366,2	384,9	400,4	417,3	441,8	462,3	484,9	518,3	546,8
Фторбензол	225,6	234,2	246,6	256,8	268,0	284,3	298,0	313,2	335,7	355,0
2-Фтортолуол	243,9	253,2	266,6	277,7	289,8	307,4	322,3	338,7	363,1	384,0
3-Фтортолуол	246,0	255,3	268,7	279,9	292,0	309,7	324,6	341,0	365,3	386,2
4-Фтортолуол	246,7	256,0	269,4	280,6	292,7	310,5	325,4	341,8	366,2	387,2
1-Фторэтилен	120,8	125,8	133,0	139,1	145,7	155,5	163,9	173,2	187,2	199,4
транс-Фумарилхлорид	282,7	292,8	307,4	319,5	332,6	351,5	367,4	384,8	410,4	432,2
Фурфуриловый спирт	300,5	310,5	324,8	336,5	349,1	367,2	382,2	398,5	422,3	442,3
Фурфурол	286,0	296,1	310,6	322,5	335,4	354,1	369,7	386,7	411,8	433,0
Хлоральгидрат	260,0	268,0	279,2	288,3	298,0	312,0	323,4	335,8	353,6	368,3
2-Хлоранилин	312,2	323,4	339,5	352,8	367,2	388,2	405,6	424,8	453,0	477,0
4-Хлоранилин	326,1	338,0	355,0	369,1	384,4	406,6	425,2	445,6	475,7	501,3
Хлорбензол	254,9	264,7	278,7	290,4	303,1	321,7	337,3	354,5	380,2	402,3
1-Хлорбутан	219,6	228,1	240,4	250,6	261,7	278,0	291,8	306,9	329,6	349,1
Хлордиметилфенилсилан	296,7	307,8	323,9	337,2	351,7	372,8	390,6	410,1	439,2	464,1
Хлордифторметан	147,5	153,0	161,0	167,6	174,7	185,2	194,0	203,6	217,9	230,2
α-Хлоркротоновая кислота	338,3	348,8	363,7	375,9	388,9	407,5	422,8	439,3	463,2	483,1
Хлорметилсилан	174,2	181,0	191,0	199,2	208,2	221,5	232,7	245,0	263,6	279,6
Хлорпикрин	243,1	252,3	265,6	276,7	288,7	306,3	321,1	337,4	361,6	382,4
2-Хлорпиридин	280,4	291,1	306,4	319,2	333,0	353,3	370,4	389,1	417,1	441,1
1-Хлорпропан	200,8	208,4	219,5	228,7	238,7	253,3	265,6	279,2	299,4	316,7
2-Хлорпропан	190,5	198,0	208,9	218,0	227,8	242,4	254,7	268,3	288,7	306,4
1-Хлорпропилен	187,6	195,3	206,3	215,6	225,7	240,6	253,3	267,4	288,6	307,0
3-Хлорпропилен	198,8	206,5	217,5	226,7	236,7	251,4	263,7	277,4	297,7	315,2
γ-Хлорпропилтрихлорсилан	—	—	315,4	328,4	342,6	363,4	380,9	400,1	428,7	453,3
3-Хлорстирол	292,3	303,4	319,5	332,8	347,3	368,6	386,5	406,2	435,5	460,7
4-Хлорстирол	295,1	306,1	322,0	335,3	349,6	370,5	388,1	407,5	436,2	460,8
α-Хлортолуол	289,8	300,6	316,0	328,8	342,6	362,8	379,8	398,4	426,0	449,6
2-Хлортолуол	272,9	283,3	298,3	310,8	324,4	344,2	360,9	379,4	406,8	430,4
3-Хлортолуол	272,8	283,3	298,6	311,2	325,0	345,3	362,3	381,2	409,3	433,5
4-Хлортолуол	273,7	284,2	299,5	312,1	325,8	346,0	362,9	381,6	409,5	433,5
Хлортриметилсилан	206,3	214,3	225,8	235,4	245,9	261,3	274,2	288,6	310,0	328,4
Хлортрифторметан	121,0	125,5	132,1	137,5	143,4	152,1	159,4	167,4	179,3	189,4
2-Хлор-α, α, α-трифторотолуол	267,7	277,9	292,7	305,0	318,4	338,0	354,5	372,7	399,9	423,2
1-Хлор-1,2,2-трифторэтилен	153,7	159,5	168,0	175,1	182,8	194,0	203,4	213,9	229,4	242,7
Хлортриэтилсилан	263,3	273,4	288,0	300,1	313,3	332,6	348,9	366,8	393,6	416,6
Хлоруксусная кислота	311,0	321,5	336,5	348,8	362,1	381,2	397,1	414,4	439,6	460,9
Хлоруксусный ангидрид	335,9	346,9	362,5	375,3	389,1	408,9	425,3	443,1	468,9	490,6
4-Хлорфенетиловый спирт	351,4	363,7	381,3	395,9	411,6	434,3	453,3	473,9	504,3	530,1
2-Хлорфенол	279,6	290,4	306,1	319,1	333,3	354,2	371,7	391,1	420,1	445,0
3-Хлорфенол	311,5	323,1	339,8	353,6	368,5	390,4	408,8	428,9	458,8	484,4
4-Хлорфенол	317,3	329,0	345,9	359,8	375,0	397,0	415,5	435,8	465,9	491,6
бис-2-Хлорэтилацеталь	324,3	335,4	351,4	364,5	378,6	399,1	416,1	434,6	461,8	484,7
1-Хлор-2-этилбензол	284,6	295,4	311,0	323,9	337,9	358,5	375,7	394,8	423,1	447,4
1-Хлор-3-этилбензол	286,0	297,0	312,8	325,9	340,1	361,0	378,6	398,0	426,9	451,7
1-Хлор-4-этилбензол	287,0	298,1	314,1	327,5	342,0	363,3	381,2	401,0	430,6	456,0
1-Хлорэтилен	164,1	170,3	179,2	186,6	194,7	206,4	216,3	227,2	243,4	257,3
2-Хлорэтилхлорацетат	313,3	324,4	340,4	353,6	367,8	388,5	405,7	424,6	452,4	475,9
2-Хлорэтил-2-хлоризопропиловый эфир	292,3	303,0	318,4	331,1	344,8	364,9	381,6	400,0	427,2	450,4
2-Хлорэтил-2-хлорпропиловый эфир	297,3	308,4	324,5	337,8	352,3	373,4	391,1	410,6	439,6	464,4
1-Хлор-2-этоксибензол	313,1	324,4	340,6	354,1	368,6	389,7	407,3	426,7	455,2	479,5
2-(2-Хлорэтокси)-этанол	321,1	331,5	346,3	358,5	371,5	390,3	405,8	422,6	447,0	467,5
Циан бромистый	234,1	241,2	251,4	259,7	268,5	281,1	291,5	302,6	318,8	332,2
Циан иодистый	294,6	303,4	315,8	325,9	336,7	352,1	364,7	378,3	397,8	413,9
2-Циано-2-бутилацетат	310,4	321,2	336,7	349,4	363,2	383,1	399,8	417,9	444,5	467,0
Циан фтористый	137,1	141,5	147,9	153,2	158,8	166,9	173,6	180,8	191,4	200,2
Циан хлористый	193,1	199,5	208,6	216,0	224,0	235,5	245,0	255,4	270,4	283,1
Циклобутан	177,0	183,9	194,0	202,3	211,4	224,8	236,1	248,7	267,4	283,5

тво	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Циклобутен	170,4	177,2	186,9	195,0	203,8	216,8	227,8	240,0	258,2	273,9
Циклогексан	222,9	231,4	243,5	253,6	264,5	280,6	294,0	308,8	330,9	349,8
Циклогексанол	288,7	298,7	312,9	324,7	337,3	355,6	370,8	387,4	411,7	432,2
Циклогексанон	268,7	279,1	294,0	306,4	319,9	339,7	356,4	374,8	402,3	425,9
Циклогексанэтанол	318,0	329,0	344,7	357,6	371,5	391,6	408,4	426,6	453,3	475,9
Циклопентан	201,1	208,9	220,1	229,5	239,6	254,6	267,2	281,1	301,8	319,7
Циклопропан	153,1	158,8	166,9	173,6	180,8	191,4	200,3	210,1	224,5	236,8
Цитраконовый ангидрид	314,2	325,7	342,2	355,8	370,6	392,1	410,2	429,9	459,2	484,1
Энантлхлорид	302,9	311,5	323,5	333,3	343,7	358,4	370,4	383,3	401,7	416,9
Энантовая кислота	343,7	354,3	369,3	381,4	394,5	413,1	428,4	444,9	468,8	488,6
Энантовый альдегид	276,7	286,3	300,0	311,3	323,5	341,1	355,8	371,8	395,2	415,1
Энантонитрил	288,6	299,6	315,6	328,8	343,1	364,2	381,9	401,4	430,5	455,4
Эпихлоргидрин	252,1	261,3	274,6	285,5	297,4	314,7	329,2	345,0	368,5	388,6
1,2-Этокси-2-метилпропан	199,6	207,7	219,4	229,2	239,9	255,7	269,1	284,0	306,4	325,8
Этан	111,1	115,7	122,3	127,9	134,0	143,0	150,6	159,1	172,0	183,2
Этанол	238,6	246,5	257,8	267,0	276,9	291,2	303,0	315,9	334,6	350,3
Этилакрилат	238,4	247,2	259,9	270,5	281,8	298,5	312,4	327,7	350,4	369,8
α-Этилакрилнитрил	239,1	248,5	262,2	273,6	285,9	304,2	319,6	336,6	362,1	384,1
α-Этилакриловая кислота	315,5	325,3	339,2	350,6	362,7	380,1	394,4	409,9	432,2	450,8
Этиламин	187,4	194,2	204,0	212,1	220,9	233,6	244,3	256,0	273,2	287,9
N-Этиланилин	306,2	317,6	334,1	347,6	362,4	383,9	402,0	421,8	451,3	476,4
4-Этиланилин	319,5	331,0	347,6	361,2	375,9	397,4	415,3	434,9	463,9	488,5
Этилацетат	226,0	234,2	246,1	255,9	266,5	281,9	294,9	309,1	330,0	347,9
Этилацетоацетат	296,3	306,9	322,2	334,8	348,4	368,2	384,7	402,8	429,5	452,2
Этилбензол	258,2	268,0	282,2	294,0	306,7	325,4	341,2	358,5	384,3	406,4
Этилбромид	195,2	202,6	213,5	222,5	232,2	246,6	258,7	272,0	291,8	308,9
Этил-α-бромизобутират	278,2	288,6	303,7	316,1	329,7	349,5	366,I	384,4	411,5	434,8
Этилбутират	249,8	259,2	272,8	284,1	296,3	314,1	329,2	345,7	370,2	391,3
Этилвинилдихлорсилан	—	—	271,5	283,1	295,7	314,2	329,8	347,1	372,9	395,1
3-Этилгексан	247,8	257,1	270,6	281,8	293,9	311,6	326,5	342,9	367,3	388,2
Этилгликолат	282,8	292,9	307,3	319,1	332,0	350,6	366,1	383,1	408,1	429,3
2-Этилдисилазан	206,7	215,0	227,1	237,2	248,2	264,4	278,2	293,5	316,5	336,4
Этилдихлорацетат	277,3	287,5	302,1	314,2	327,2	346,3	362,3	379,8	405,7	427,8
Этилдихлорсилан	—	—	233,9	244,4	255,9	272,9	287,3	303,3	327,5	348,5
Этил-*N*, *N*-диэтилоксамат	343,8	356,1	373,7	388,2	403,9	426,7	445,7	466,5	497,2	523,2
Этилен	102,8	107,0	113,2	118,3	123,8	132,1	139,1	146,9	158,6	168,8
Этилена оксид	179,9	186,7	196,4	204,5	213,3	226,1	236,9	248,7	266,4	281,4
1,2-Этиленгликоль	322,3	332,8	347,7	360,0	373,1	392,0	407,7	424,6	449,3	470,0
Этилендиамин	257,3	266,4	279,3	289,9	301.4	318,0	331,9	347,0	369,3	388,1
Этилен-*бис*-(хлорацетат)	379,7	392,1	409,8	424,3	439,8	462,3	480,8	500,9	530,2	554,7
Этиленхлоргидрин	264,9	274,2	287,6	298,6	310,5	327,8	342,2	357,9	381,0	400,6
Этилизобутират	244,3	253,4	266,6	277,4	289,2	306,5	320,9	336,8	360,5	380,6
Этилизовалерат	262,0	271,7	285,5	297,0	309,5	327,6	342,8	359,5	384,2	405,3
Этилизокапронат	279,1	289,3	304,1	316,3	329,5	348,8	364,9	382,6	408,9	431,3
Этилизотиоцианат	255,5	265,2	279,3	291,0	303,7	322,4	338,0	355,3	381,1	403,2
Этилиодид	214,7	223,0	235,1	245,1	256,0	272,1	285,6	300,6	322,9	342,2
Этиллевулинат	314,8	325,9	341,8	355,0	369,2	389,8	406,9	425,7	453,3	476,7
Этил-*l*-лейцинат	298,0	309,2	325,4	338,8	353,4	374,7	392,6	412,3	441,6	466,6
Этилмеркаптан	192,7	200,1	210,9	219,8	229,5	243,7	255,7	268,8	288,6	305,6
Этилметиловый эфир	178,0	184,7	194,4	202,4	211,1	223,8	234,4	246,2	263,6	278,5
3-Этилпентан	230,7	239,4	252,0	262,5	273,8	290,4	304,4	319,7	342,6	362,2
Этилпропиловый эфир	204,4	212,6	224,4	234,3	245,2	261,1	274,6	289,6	312,1	331,6
Этилпропионат	240,5	249,2	261,7	272,1	283,3	299,6	313,3	328,2	350,3	369,2
Этилтриметилолово	238,5	247,8	261,1	272,2	284,3	302,0	317,0	333,5	358,1	379,3
Этилтрифторсилан	174,6	180,8	189,7	197,1	205,1	216,6	226,3	236,8	252,4	265,6
Этилтрихлорацетат	288,1	298,3	313,1	325,2	338,3	357,4	373,3	390,7	416,3	438,1
Этилтрихлорсилан	—	—	254,3	265,1	276,9	294,2	308,8	324,9	349,0	369,7
Этилтриэтоксисилан	—	—	304,9	317,1	330,3	349,5	365,6	383,3	409,4	431,7
2-Этилфенол	313,8	325,0	341,1	354,4	368,8	389,7	407,1	426,2	454,3	478,2
3-Этилфенол	327,7	338,8	354,6	367,6	381,6	401,8	418,6	436,8	463,5	486,0
4-Этилфенол	326,7	338,0	354,3	367,7	382,1	403,1	420,5	439,5	467,4	491,0
Этилформиат	207,6	215,4	226,4	236,0	246,2	261,0	273,5	287,2	307,6	325,0
Этилфторид	152,3	158,1	166,3	173,2	180,7	191,6	200,7	210,8	225,8	238,7

Вещество	Давление пара, кПа									
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Этил-2-фуроат	304,7	315,7	331,5	344,5	358,6	379,1	396,2	414,9	442,6	466,1
Этилхлорацетат	269,6	279,4	293,7	305,4	318,1	336,7	352,2	369,3	394,5	416,0
Этилхлорид	179,2	186,0	195,9	204,0	212,9	226,0	236,9	249,0	267,0	282,4
Этил-α-хлорпропионат	274,9	284,6	298,5	309,9	322,3	340,3	355,2	371,6	395,6	416,0
Этилцианацетат	337,0	347,3	362,0	373,9	386,7	405,0	420,0	436,2	459,6	479,1
Этилциклогексан	253,6	263,3	277,4	289,1	301,8	320,5	336,2	353,5	379,4	401,6
Этилциклопентан	236,0	245,0	258,0	268,9	280,6	297,9	312,4	328,4	352,3	372,7
Этил-α-этилацетоацетат	307,9	318,9	334,7	347,7	361,8	382,3	399,4	418,1	445,7	469,1
Этокситриметилсилан	217,8	226,2	238,4	248,6	259,6	275,8	289,5	304,6	327,2	346,6
Янтарный ангидрид	354,6	366,8	384,2	398,5	414,0	436,3	454,9	475,2	504,9	529,9

Таблица 11.6. **Давление паров органических веществ (выше 10^5 Па)** [115]

Анилин (C_6H_7N)

t, °C	p, 10^5 Па
212,8	2,02
254,8	5,06
292,7	10,13
342,0	20,26
375,5	30,39
400,0	40,52
422,4	50,65
426,0	53,08

Ацетилен (C_2H_2) (T, К)

t, °C	p, 10^5 Па
192,4	1,283
200,9	2,026
209,4	3,039
221,5	5,065
230,4	7,091
240,7	10,13
253,2	15,20
263,0	20,26
271,6	25,33
278,9	30,39
284,9	35,45
290,4	40,52
300,0	50,65
307,8	60,78
308,7	62,45

Ацетон (C_3H_6O)

t, °C	p, 10^5 Па
78,6	2,02
113,0	5,06
144,5	10,13
181,0	20,26
205,0	30,39
214,5	40,52
235.0	47,61

Бензол (C_6H_6) (T, К)

t, °C	p, 10^5 Па
360	1,243
380	2,164
400	3,536
410	4,428
420	5,479
430	6,704
440	8,121
450	9,746
460	11,60
470	11,69
480	16,01
490	18,70
500	21,66
510	24,96
520	28,62
530	32,69
540	37,19
550	42,18
560	47,71
562,6	49,24

***н*-Бутан (C_4H_{10})**

t, °C	p, 10^5 Па
0	1,032
10	1,483
20	2,074
30	2,83
40	3,78
50	4,96
60	6,39
70	8,10
80	10,13
90	12,50
100	15,29
110	18,52
120	22,23
130	26,48
140	31,29
150	36,73
152,01	37,96

***н*-Бутанол ($C_4H_{10}O$)**

t, °C	p, 10^5 Па
139,8	2,03
172,5	5,06
203,0	10,13
237,0	20,26
259,0	30,39
277,0	40,52
288,0	49,03

Бутен-1 (C_4H_8)

t, °C	p, 10^5 Па
0	1,285
10	1,838
20	2,557
30	3,472
40	4,62
50	6,02
60	7,63
70	9,59
80	11,93
90	14,68
100	17,89
110	21,59
120	25,84
130	30,68
140	36,15
146,4	40,2

***н*-Бутилбензол ($C_{10}H_{14}$)**

t, °C	p, 10^5 Па
190	1,1917
200	1,5018
210	1,8714
220	2,3078
230	2,8185
240	3,411
250	4,094

Бутин-1 (C_4H_6)

t, °C	p, 10^5 Па
10	1,06
20	1,47
30	1,70
40	1,96

***н*-Гексан (C_6H_{14})**

t, °C	p, 10^5 Па
70	1,0537
80	1,4239
90	1,8876
100	2,460
110	3,153
120	3,986
130	4,973
140	6,128
150	7,468
160	9,036
170	10,85
180	12,94
190	15,32
200	18,02
210	21,08
220	24,52
230	28,37
234,7	30,31

Гексен-1 (C_6H_{12})

t, °C	p, 10^5 Па
70	1,2398
80	1,6626
90	2,1885
100	2,8326
110	3,610
120	4,537
130	5,629

***н*-Гептадекан ($C_{17}H_{36}$)**

t, °C	p, 10^5 Па
310	1,1794
462	13,169

***н*-Гептан (C_7H_{16})**

t, °C	p, 10^5 Па
100	1,0606
120	1,8330
140	2,979
160	4,599
180	6,78
200	9,71
220	13,54
240	18,47
260	24,65
267,01	27,36

Гептен-1 (C_7H_{14})

t, °C	p, 10^5 Па
100	1,2180
110	1,6046
120	2,0797
130	2,6556
140	3,345
150	4,161
160	5,118

***н*-Декан ($C_{10}H_{22}$)**

t, °C	p, 10^5 Па
180	1,1737
190	1,4921
200	1,8740
210	2,3274
220	2,8603
230	3,482
240	4,199
250	5,022
346	21,07

1,1-Диметилциклопентан (C_7H_{15})

t, °C	p, 10^5 Па
90	1,0784
100	1,4263
110	1,8550
120	2,3756
130	2,9998
140	3,7397
150	4,6070
160	5,6137

Дифенил ($C_{12}H_{10}$)

t, °C	p, 10^5 Па
260	I,08
280	1,74
300	2,38
320	3,38
340	4,47
360	6,55
380	8,8

Дифтордихлорметан (фреон-12) (CF_2Cl_2)

t, °C	p, 10^5 Па
—30	1,0143
—20	1,527
—10	2,219
0	3,125
10	4,285
20	5,739
30	7,529
40	9,687
50	12,28
60	15,34
70	18,94
80	23,13
90	27,99
100	33,60
111,8	41,32

Дифтормонохлорметан (фреон-22) (CHF_2Cl)

t, °C	p, 10^5 Па
—40	1,054
—30	1,641
—20	2,456
—10	3,552
0	4,983
10	6,811
20	9,097
30	11,908
40	15,315
50	19,395
60	24,236
70	29,94
80	36,62
90	44,43
96,13	49,86

***н*-Додекан ($C_{12}H_{26}$)**

t, °C	p, 10^5 Па
220	1,1059
230	1,3890
240	1,7258
250	2,1227
386	18,1

Изопропилбензол (C_9H_{12})

t, °C	p, 10^5 Па
160	1,2290
170	1,5656
180	1,9698
190	2,4498
200	3,0146
210	3,673
220	4,434
230	5,306

***орто*-Ксилол (C_8H_{10})**

t, °C	p, 10^5 Па
150	1,172
160	1,505
170	1,907
180	2,388
190	2,956
200	3,622
210	4,390
220	5,280
230	6,305
240	7,500
250	8,820
260	10,32
270	12,00
280	13,90
290	16,02
300	18,35
310	20,95
320	23,79
330	26,87
340	30,32
350	34,36
358,44	38,08

Метан (CH_4) (T, К)

t, °C	p, 10^5 Па
115	1,324
120	1,920
125	2,691
130	3,671
135	4,895
140	6,375
145	8,136
150	10,33
155	12,88
160	15,88
165	19,38
170	23,38
175	27,88
180	32,88
185	38,54
190	45,52
190,55	46,41

Метанол (CH_4O)

t, °C	p, 10^5 Па
84,0	2,03
112,5	5,06
138,0	10,13
167,8	20,26
186,5	30,39
203,5	40,52
214,0	50,65
224,0	60,78
240,0	79,72

Метилацетилен (C_3H_4)

t, °C	p, 10^5 Па
—20	1,17
—10	1,84
0	2,79
10	4,05
20	5,77
30	6,79
40	8,00
50	10,84
60	14,38
70	18,64

2-Метилбутадиен-1,3 (C_5H_8)

t, °C	p, 10^5 Па
40	1,2374
50	1,7012
60	2,2889
70	3,0202
80	3,915
90	4,996
100	6,282

2-Метилбутан (C_5H_{12})

t, °C	p, 10^5 Па
30	1,090
40	1,511
50	2,048
60	2,719
70	3,541
80	4,536
90	5,721
100	7,11
110	8,77
120	10,69
130	12,93
140	15,49
150	18,43
160	21,75
170	25,51
180	29,71
187,8	33,3

2-Метилпропен (C_4H_8)

t, °C	p, 10^5 Па
0	1,315
10	1,87
20	2,58
30	3,50
40	4,64
50	6,06
60	7,77
70	9,82
80	12,26
90	15,09
100	18,37
110	22,16
120	26,34
130	31,28
140	36,70

Метил хлористый (CH_3Cl)

t, °C	p, 10^5 Па
—20	1,188
—10	1,772
0	2,557
10	3,582
20	4,893
30	6,525
40	8,516
50	10,92
60	13,75

Метилциклогексан (C_7H_{14})

t, °C	p, 10^5 Па
110	1,2986
130	2,146
150	3,362
170	5,01

t, °C	p, 10^5 Па
190	7,23
210	10,10
230	13,83
250	18,48
270	24,21
290	31,16

Метилциклопентан (C_6H_{12})

80	1,2946
100	2,238
120	3,632
140	5,59
160	8,22
180	11,73
200	16,28
220	22,05
240	29,24

Монофтордихлорметан (фреон-21) ($CHFCl_2$)

10	1,0578
20	1,5305
30	2,1534
40	2,9550
50	3,9655
60	5,2160
70	6,7389
80	8,5675
90	10,737
100	13,283
110	16,245
120	19,666
130	23,593
140	28,081
150	33,195
160	39,008
170	45,612
178,25	51,812

Монофтортрихлорметан (фреон-11) ($CFCl_3$)

24	1,026
30	1,263
40	1,748
50	2,366
60	3,138
70	4,088
80	5,240
90	6,619
100	8,253
110	10,168
120	12,393
130	14,959
140	17,896

Нафталин ($C_{10}H_8$)

220	1,060
230	1,321
240	1,629
250	1,993
260	2,53
270	2,99
280	3,57
290	4,23
300	4,97
310	5,82
320	6,79
330	7,86
340	9,05
350	10,33
360	11,85
370	13,37

***н*-Нонадекан ($C_{19}H_{40}$)**

340	1,195
487	12,156

***н*-Нонан (C_9H_2O)**

160	1,2846
170	1,6410
180	2,070
190	2,579
200	3,179
210	3,879
220	4,689
230	5,618
322	22,8

***н*-Октан (C_8H_{18})**

130	1,1408
150	1,9022
170	3,006
190	4,536
210	6,582
230	9,270
250	12,79
270	17,29
290	22,94
296,2	24,96

Октен-1 (C_8H_{16})

130	1,2843
140	1,6619
150	2,1202
160	2,6698
170	3,322
180	4,086

***н*-Пентан (C_5H_{12})**

40	1,156
50	1,591
60	2,145
70	2,832
80	3,676
90	4,693
100	5,906
110	7,333
120	8,985
130	10,94
140	13,20
150	15,79
160	18,74
170	22,08
180	25,84
190	30,04
196,62	33,74

Пентен-1 (C_5H_{10})

40	1,4162
60	2,5797
80	4,354
100	6,900
120	10,54
140	15,26
160	21,56
180	29,76
200	40,26
201	40,4

Пропадиен (C_3H_4)

—30	1,22
—20	1,84
—10	2,68
0	3,81
10	5,28
20	7,14
25	8,24
30	9,47
40	12,4
50	15,8
60	20,0
70	24,8

Пропан (C_3H_8) (T, K)

231,10	1,013
259,83	3,039
275,24	5,065
286,90	7,091
296,30	9,117
317,42	15,20
341,71	25,33
359,61	35,45
370,0	42,65

Пропанол-1 (C_3H_8O)

117,0	2,03
149,0	5,06
177,0	10,13
210,8	20,26
232,3	30,39
250,0	40,52
263,7	50,55

Пропилен (C_3H_6)

—40	1,425
—30	2,132
—20	3,08
—10	4,30
0	5,82
10	7,74
20	10,10
30	12,98
40	16,45
50	20,54
60	25,38
70	31,00
80	37,47
90	44,88
91,9	46,0

Толуол (C_7H_8)

120	1,312
140	2,180
160	3,433
180	5,165
200	7,474
220	10,93
240	15,26
260	20,50
280	26,69
300	33,82
310	37,74

***н*-Тридекан ($C_{13}H_{28}$)**

240	1,1230
404	17,2

Трифтормонохлорметан (фреон-13) (CF_3Cl)

—80	1,094
—70	1,797
—60	2,803
—50	4,183
—40	6,017
—30	8,393
—20	11,40
—10	15,13
0	19,70
10	25,23
20	31,84
29,13	39,00

Тетрафтордихлорэтан (фреон-114) ($C_2F_4Cl_2$)

5	1,069
10	1,289
20	1,836
30	2,584
40	3,453
50	4,583
60	5,963

Углерод четыреххлористый (CCl_4)

90	1,482
110	2,506
130	4,001
150	6,071
170	8,852
190	12,41
210	17,01
230	22,73
250	29,57
270	38,65
283,05	46,49

t, °C	p, 10^5 Па
Хлорбензол (C_6H_5Cl)	
140	1,252
160	2,044
180	3,158
200	4,693
220	6,739
240	9,434
260	12,85
329,2	31,90
359,2	45,22
Циклогексан (C_6H_{12})	
90	1,3272
110	2,260
130	3,622
150	5,52
170	8,059
190	11,34
210	15,52
230	20,82
250	27,45
270	35,61
Циклогексен (C_6H_{10})	
90	1,2450
100	1,6443
110	2,1358
120	2,7324
130	3,447
140	4,294
150	5,287
Циклопентан (C_5H_{10})	
50	1,038
70	1.905
90	3,252
110	5,211
130	7,950
150	11,67
170	16,58
190	22,87
210	30,74
230	40,39
Этан (C_2H_6) (T, К)	
184,52	1,013
190	1,347
200	2,174
210	3,340
220	4,921
230	7,002
240	9,675
250	13,02
260	17,12
270	22,08
280	28,01
290	35,10
300	43,65
305,5	49,13
Этанол (C_2H_6O)	
97,5	2,03
126,0	5,06
151,8	10,13
183,0	20,26
203,0	30,39
218,0	40,52
230,0	50,65
242,0	60,78
243,1	63,92
Этилацетат ($C_4H_8O_2$)	
80	1,110
100	2,022
120	3,447
140	5,552
160	8,489
180	12,42
200	17,60
220	24,33
240	33,06
250,1	38,49
Этилбензол (C_8H_{10})	
140	1,1211
150	1,4477
160	1,8440
170	2,319
180	2,883
190	3,546
200	4,317
210	5,208
220	6,229
Этилен (C_2H_4)	
0	40,94
2	42,84
4	44,79
6	46,82
8	48,92
9,5	50,6
Эфир диэтиловый ($C_4H_{10}O$)	
40	1,228
60	2,311
80	3,964
100	6,471
120	10,01
140	14,73
160	21,03
180	29,02
190	34,01
193,8	36,06

11.4. КОЭФФИЦИЕНТ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПНЫХ МОЛЕКУЛ

Коэффициент разделения двухкомпонентной жидкой смеси определяется как отношение относительных концентраций компонент c_1, c_2 в паре и в жидкости:

$$\alpha = \left(\frac{c_1}{c_2}\right)_{\text{пар}} \Big/ \left(\frac{c_1}{c_2}\right)_{\text{жидк}}.$$

Для идеальных растворов, к которым относятся смеси изотопных молекул, коэффициент разделения равен отношению давлений пара чистых компонент:

$$\alpha(t) = p_1(t)/p_2(t).$$

В табл. 11.7 приведены значения коэффициента разделения изотопных молекул.

Таблица 11.7. **Значения коэффициента разделения молекул двухкомпонентных изотопных смесей при различной температуре**

t, °C	α
Азота тетраоксид	
$^{14}N_2O_4 - {}^{14}N^{15}NO_4$ [121]	
21	1,0038
Анилин	
$C_6D_7N - C_6H_7N$ [122]	
50	1,036
55	1,026
60	1,019
65	1,014
70	1,011
75	1,008
80	1,006
Бензол	
$C_6D_6 - C_6H_6$ [123]	
10	1,0241
20	1,0249
30	1,0258
40	1,0262
50	1,0261
60	1,0254
70	1,0251
80	1,0249
82	1,0249

t, °C	α

$^{13}C_6H_6 - {}^{12}C_6H_6$ [124]

34,6	1,00025

Бор трехфтористый

$^{11}BF_3 - {}^{10}BF_3$ [125]

—120	1,0035
—115	1,0048
—110	1,0060
—105	1,0072

Бор треххлористый

$^{11}BCl_3 - {}^{10}BCl_3$ [126]

—85	0,9988
—80	0,9991
—70	0,9997
—60	1,0002
—50	1,0007
—40	1,0012
—30	1,0016
—20	1,0020
—10	1,0023
0,0	1,0026
10	1,0029
12,7	1,0030

***n*-Бутиловый спирт**

$C_4D_{10}O - C_4H_{10}O$ [121]

20	1,063
30	1,059
40	1,054
50	1,050
60	1,046
70	1,042
80	1,038
90	1,034
100	1,031

Вода

$H_2O - D_2O$ [127]

0,0	1,255
10	1,182
20	1,154
30	1,137
40	1,122
50	1,107
60	1,094
70	1,081
80	1,071
90	1,061
100	1,052
110	1,045
120	1,038
130	1,032
140	1,027
150	1,022
160	1,018
170	1,014
180	1,011
190	1,008
200	1,005
210	1,003
220	1,001
230	0,9989
240	0,9958

$H_2O - T_2O$ [128]

20	1,113
30	1,096
40	1,076
50	1,064
60	1,052

$H_2{}^{16}O - H_2{}^{18}O$ [129]

20	1,0093
30	1,0085
40	1,0077
50	1,0069
60	1,0062
70	1,0055
80	1,0049
90	1,0043
100	1,0037
110	1,0032
120	1,0027
130	1,0022
140	1,0018
150	1,0013
160	1,0009
170	1,0005
180	1,0001
190	0,9998
200	0,9994
210	0,9991

$H_2{}^{16}O - H_2{}^{17}O$ [130]

52	1,0039
73	1,0030

Водород хлористый

$H^{35}Cl - H^{37}Cl$ [131]

—105	1,0021
—100	1,0019
—95	1,0017
—90	1,0015

Диборан

$B_2D_6 - B_2H_6$ [74]

—155	1,0525
—150	1,0495
—140	1,0456
—130	1,0439
—120	1,0442
—110	1,0449
—100	1,0478
—90	1,0516

Изовалериановая кислота

$C_5H_{10}O_2 - C_5D_{10}O_2$ [122]

55	1,034
60	1,036
70	1,037
80	1,038
90	1,039
100	1,039
110	1,039

Изомасляная кислота

$C_4H_8O_2 - C_4D_8O_2$ [122]

50	1,015
60	1,022
70	1,029
80	1,035
90	1,041

Изопропиловый спирт

$C_3D_8O - C_3H_8O$ [122]

15	1,065
20	1,062
30	1,055
40	1,048
50	1,042
60	1,037
70	1,033
80	1,029

Кислород

$^{16}O_2 - {}^{18}O_2$ [132]

—210	1,0131
—205	1,0121
—200	1,0112
—195	1,0105
—190	1,0098
—185	1,0092
—182,97	1,0089

Криптон

$^{82}Kr - {}^{86}Kr$ [133]

—152	1,00048

Ксенон

$^{130}Xe - {}^{136}Xe$ [133]

—108	1,0001

Литий

$^{6}Li - {}^{7}Li$ [134]

400	1,060
450	1,047
500	1,036
550	1,026

Масляная кислота

$C_4H_8O_2 - C_4D_8O_2$ [122]

50	1,010
60	1,029
70	1,047
80	1,060
90	1,055
100	1,049
110	1,043
115	1,040

Метан

$CD_4 - CH_4$ [135]

—182,7	1,0130

$^{12}CH_4 - {}^{13}CH_4$ [131]

—182,7	1,0114
—180	1,0112
—175	1,0108
—170	1,0105
—165	1,0102
—161,3	1,0098

Метиловый спирт

$^{13}CH_4O - {}^{12}CH_4O$ [124]

34,6	1,0002

Неон

$^{20}Ne - {}^{22}Ne$ [136]

—256,74	1,131
—256	1,115
—255	1,103
—254	1,092
—253	1,085
—252	1,078
—251	1,071
—250	1,066
—249	1,061
—248	1,046
—247	1,043
—246	1,040
—245	1,038
—244	1,036
—243	1,034

Пентаборан

$B_5D_9 - B_5H_9$ [93]

—45	1,0656
—40	1,0634
—30	1,0593
—20	1,0555
—10	1,0521
0,0	1,0489
10	1,0460
20	1,0434
30	1,0409

t, °C	α
40	1,0387
50	1,0366
60	1,0347

Сернистый газ

$^{32}SO_2$—$^{35}SO_2$ [137]

—35	1,0018

Сероводород

$H_2{}^{32}S$—$H_2{}^{35}S$ [137]

—76	1,0055
—65	1,0058

Углерода окись

^{12}CO—^{13}CO [138]

—204	1,0130
—200	1,0119
—195	1,0106
—190	1,0094
—185	1,0084
—180	1,0075
—175	1,0067
—170	1,0059

Углерод четыреххлористый

$^{13}CCl_4$—$^{12}CCl_4$ [124]

34,6	1,0013

Уксусная кислота

$C_2D_4O_2$—$C_2H_4O_2$ [139]

20	1,0457
30	1,0450
40	1,0440
50	1,0438
60	1,0432
70	1,0427
80	1,0423
90	1,0418
100	1,0414
110	1,0410
120	1,0406
125	1,0405

Хлороформ

$^{13}CH_3Cl$—$^{12}CH_3Cl$ [124]

34,6	1,0008

Циклогексан

C_6D_{12}—C_6H_{12} [123]

10	1,0933
20	1,0903
30	1,0877
40	1,0837
50	1,0809
60	1,0774
70	1,0744
80	1,0683

Этилен

C_2H_3D—C_2H_4 [140]

—154,88	1,0024
—150	1,0033
—140	1,0046
—130	1,0055
—120	1,0062
—110	1,0067
—100	1,0070
—91,85	1,0071

цис-$C_2H_2D_2$—C_2H_4 [141]

—160	1,0030
—150	1,0064
—140	1,0095
—130	1,0121
—120	1,0136
—110	1,0146
—100	1,0153
—90	1,0157

транс-$C_2H_2D_2$—C_2H_4 [141]

—160	1,0047
—150	1,0085
—140	1,0112
—130	1,0131
—120	1,0143
—110	1,0153
—100	1,0159
—90	1,0162

гем-$C_2H_2D_2$—C_2H_4 [141]

—160	1,0032
—150	1,0084
—140	1,0096
—130	1,0123
—120	1,0138
—110	1,0148
—100	1,0155
—90	1,0159

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ривкин С. Л., Александров А. А.** Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. **Чайхорский А. А.** Химия нептуния. М.: Атомиздат, 1978.
3. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под ред. академика И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
4. **Carniglia S. C., Gunningham B. B.**//J. Amer. Chem. Soc. 1955. Vol. 77. № 6. P. 1502—1509.
5. **Erway N. D., Simpson O. C.**//J. Chem. Phys. 1960. Vol. 18. P. 983—984.
6. **Green J. W.** Ibid. 1964. Vol. 41, № 8. P. 2245—2249.
7. **Щукарев С. А., Семенов Г. А.**//Журн. неорган. химии. 1957. Т. 2, Вып. 6. С. 1217—1220.
8. **Blauer J. A., Greenbaum M. A., Farber M.**//J. Phys. Chem. 1965. Vol. 69, № 3. P. 1069—1073.
9. **Greenbaum M. A., Foster J. N., Arin M. L. e. a.**// Ibid. 1963. Vol. 67, № 1. P. 36—41.
10. **Greenbaum M. A., Yates R. E., Farber M.**//Ibid. 1963. Vol. 67, № 9. P. 1802—1803.
11. **Soulen J. R., Sthapitanonda P., Margrave J. L.**// Ibid. 1955. Vol. 59, № 2. P. 132—133.
12. **Darnell A. J., Yosim S. J.**//Ibid. 1959. Vol. 63, № 11. P. 1813—1821.
13. **Blackburn P. E., Hoch M., Jonston H. L.**//Ibid. 1958. Vol. 62, № 7. P. 769—771.
14. **Smith F. J., Barrow R. F.**//Trans. Faraday Soc. 1958. Vol. 54, № 426. P. 826—828.
15. **Щукарев С. А., Семенов Г. А., Ратьковский И. А.** //Журн. неорган. химии. 1961. Т. 6. Вып. 8. С. 1973—1975.
16. **Лю Цюнь-Хуа, Пашинкин А. С., Новоселова А. В.** //Там же. 1962. Т. 7. Вып. 5. С. 963—964.
17. **Давыдов В. И., Диев Н. П.**//Там же. 1957. Т. 2. Вып. 9. С 2003—2004.
18. **Chikara Hirama**//J. Phys. Chem. 1962. Vol. 66, № 8. P. 1563.
19. **Habermann C. E., Daane A. H.**//J. Chem. Phys. 1964. Vol. 41, № 9. P. 2818—2821.
20. **Maclaren R. O., Gregory N. W.**//J. Phys. Chem. 1955. Vol. 59, № 2. P. 184—186.
21. **Sime R. J., Gregory N. W.**//J. Phys. Chem. 1960. Vol. 64, № 1. P. 86—87.
22. **Щукарев С. А., Семенов Г. А., Ратьковский И. А. и др.**//Журн. общ. химии. 1961. Т. 31. Вып. 7. С. 2090—2092.
23. **Ackermann R. J., Rauh E. G.**//J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36, № 2. P. 448—449.
24. **Пашинкин А. С., Дробот Д. В., Шевцова З. Н. и др.**//Журн. неорган. химии. 1962. Т. 7. Вып. 12. С. 2811—2812.
25. **Bloom H., Bockris O'M., Richards N. E. e. a.**// J. Amer. Chem. Soc. 1958. Vol. 80, № 9. P. 2044—2046.
26. **Pugh A. C. P., Barrow R. F.**//Trans. Faraday Soc. 1958. Vol. 54. Part 5, № 425. P. 671—673.
27. **Schulz D. A., Searcy A. W.**//J. Phys. Chem. 1963. Vol. 67, № 1. P. 103—104.
28. **Blue C. D.**//Ibid. 1963. Vol. 67, № 4. P. 877—879.
29. **Hildenbrand D. L., Potter N. D.**//Ibid. 1963. Vol. 67, № 10. P. 2231—2233.

30. **Bautista R. G., Margrave J. L.**//Ibid. 1963. Vol. 67, № 11. P. 2411—2417.
31. **Hidenbrand D. L., Potter N. D.**//J. Chem. Phys. 1964. Vol. 40, № 10. P. 2882—2884.
32. **Eick H. A., Mulford R. N. R.**//Ibid. 1964. Vol. 41, № 5. P. 1475—1479.
33. **Farber M., Meyer R. T., Margrave J. L.**//J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62, № 7. P. 883—884.
34. **Нестерова Я. М., Пашинкин А. С., Новоселова А. В.**//Журн. неорган. химии. 1961. Т. 6. Вып. 9. С. 2014—2017.
35. **Hirayama C., Ichikawa Y., De Roo A. M.**//J. Phys. Chem. 1963. Vol. 67, № 5. P. 1039—1042.
36. **Dreger L. H., Margrave J. L.**//Ibid. 1960. Vol. 64, № 9. P. 1323—1326.
37. **Zavitsano P. D.**//Ibid. 1964. Vol. 68, № 10. P. 2899.
38. **Phipps T. E.**//Доклад № 735 на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955.
39. **Ruf R., Treadwell W. D.**//Helv. Chim. Acta. 1954. Vol. 37, № 7. P. 1941—1944.
40. **Зломанов В. П., Поповкин Б. А., Новоселова А. В.**//Журн. неорган. химии. 1959. Т. 4. Вып. 12. С. 2661—2663.
41. **Пашинкин А. С., Новоселова А. В.**//Там же, 1959. Т. 4, Вып. 2. С. 2657—2659.
42. **Житенева Г. М., Румянцев Ю. В., Болондзь Ф. М.**//Тр. Восточно-Сибирского филиала СО АН СССР. 1962. Вып. 41. С. 121—124.
43. **Spedding F. H.**//Trans. Amer. Soc. Metals. 1960. Vol. 218. P. 608—611.
44. **Krikorian O. H.**//J. Phys. Chem. 1963. Vol. 67, № 8. P. 1586—1590.
45. **Карелин В. В., Несмеянов А. Н., Приселков Ю. А.**//Докл. АН СССР. 1962. Т. 144, № 2. С. 352—355.
46. **Геков Л. Х., Несмеянов А. Н., Приселков Ю. А.**// Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 1962. № 5. С. 34—35.
47. **Шахтахтинский М. Г., Кулиев А. А.**//Докл. АН СССР. 1958. Т. 123, № 6. С. 1071—1074.
48. **Зломанов В. П., Поповкин Б. А.**//Журн. неорган. химии. 1958. Т. 3. Вып. 7. С. 1473—1476.
49. **Franzen H. F., Gills P. W.**//J. Chem. Phys. 1965. Vol. 42, № 3. P. 1033—1039.
50. **Darnell A. J., Keneshca F. J.**//J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62, № 9. P. 1143—1144.
51. **Справочник химика**/Под ред. Б. П. Никольского. Л.: Химия, 1971. Т. 1.
52. **Щукарев С. А., Василькова И. В., Ефимов А. И.**// Журн. неорган. химии. 1956. Т. 1. Вып. 10. С. 2272—2277.
53. **Sime R. J., Gregory N. W.**//J. Amer. Chem. Soc. 1960. Vol. 82, № 4. P. 800—801.
54. **Allen T. L.**//Ibid. 1956. Vol. 78, № 21. P. 5476—5477.
55. **Scheer M. D., Fine J.**//J. Chem. Phys. 1962. Vol. 36, № 6. P. 1647—1648.
56. **Несмеянов А. Н., Сазонов Л. А.**//Журн. неорган. химии. 1960. Т. 5. Вып. 3. С. 519—520.
57. **Ahman D. H.**//U. S. Atomic Energy Comissi on AECD. № 3205. P. 1951—1956.
58. **Круглих А. А., Павлов В. С.**//Укр. физ. журн. 1965. Т. 10, № 9. С. 1029—1031.
59. **Несмеянов А. Н., Иофа Б. З., Стрельников А. А.**// Журн. физ. химии. 1958. Т. 32, № 4. С. 955—957.
60. **Pierce L., Pace E. L.**//J. Chem. Phys. 1955. Vol. 23, № 3. P. 551—553.
61. **Баймаков А. Ю.**//Тр. Ленингр. политехн. ин-та. 1957. № 188. С. 156—159.
62. **Sherman R. H., Glaugue W. F.**//J. Amer. Chem. Soc. 1955. Vol. 77, № 8. P. 2154—2156.
63. **Новиков Г. И., Гаврюченков Ф. Г.**//Журн. неорган. химии. 1964. Т. 9. Вып. 2. С. 475—**477.**
64. **Andersen H. C., Belz L. H.**//J. Amer. Chem. Soc. 1953. Vol. 75, № 19. P. 4828—4829.
65. **Rogers M. T., Speirs J. L.**//J. Phys. Chem. 1956. Vol. 60, № 10. P. 1462—1464.
66. **Verne L., Trevorrow E.**//Ibid. 1958. Vol. 62, № 3. P. 362—363.
67. **Рубан И. Н., Пономарев В. Д.**//Тр. Ин-та металлургии и обогащения АН КазССР. 1962. Т. 5. С. 34—36.
68. **Щукарев С. А., Суворов А. В.**//Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1961. № 4. С. 87—88.
69. **Щукарев С. А., Новиков Г. И., Коковин Г. А.**// Журн. неорган. химии. 1959. Т. 4. Вып. 10. С. 2185—2188.
70. **Щукарев С. А., Новиков Г. И., Андреева Н. В.**// Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1959. № 4. С. 120—122.
71. **Сун Инь-Чжу, Морозов И. С.**//Журн. неорган. химии. 1959. Т. 4. Вып. 2. С. 492—493.
72. **Palko A. A., Ryon A. D., Kuhn D. W.**//J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62, № 3. P. 319—321.
73. **Gibbs S. G., Shapiro J.**//J. Chem. Phys. 1959. Vol. 30, № 6. P. 1483—1485.
74. **Ditter J. F., Perrine J., Shapiro J.**//J. Chem. Engng. Data. 1961. Vol. 6, № 2. P. 271—272.
75. **Clarke J. T., Rifkin E. B., Johnston H. L.**//J. Amer. Chem. Soc. 1953. Vol. 75, № 4. P. 781—785.
76. **Wirth H. E., Palmer E. D.**//J. Phys. Chem. 1956. Vol. 60, № 7. P. 911—913.
77. **Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И.** Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976.
78. **Поляченок О. Г., Новиков Г. И.**//Журн. неорган. химии. 1963. Т. 8. Вып. 12. С. 2631—2634.
79. **Maclaren R. O., Gregory N. W.**//J. Phys. Chem. 1955. Vol. 59, № 2. P. 184—186.
80. **Фадеев В. Н., Федоров П. И.**//Журн. неорган. химии. 1963. Т. 8. Вып. 8. С. 2007—2008.
81. **Исакова Р. И., Нестеров В. Н., Шендяпин А. С.**// Там же. 1963. Т. 8. Вып. 1. С. 18—21.
82. **Толмачева Т. А., Андриновская Т. Л.**//Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1960. № 10. С. 131—134.
83. **Bloom H., Welch B. J.**//J. Phys. Chem. 1958. Vol. 62, № 12. P. 1594—1595.
84. **Long L. H., Cattanach J.**//J. Inorg. Nucl. Chem. 1961. Vol. 20, № 3/4. P. 340—341.
85. **Li J. C. M.**//J. Amer. Chem. Soc. 1956. Vol. 78, № 6. P. 1081—1083.
86. **Щукарев С. А., Василькова Н. В., Шарунин Б. Н.** //Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1961. № 22. С. 130—131.
87. **Девятых Г. Г., Фролов И. А.**//Журн. неорган. химии. 1963. Т. 8. Вып. 2. С. 265—268.
88. **Cubicciotti D., Eding H.**//J. Phys. Chem. 1965. Vol. 69, № 8. P. 2743—2744.
89. **Исакова А. И., Нестеров В. Н.**//Тр. Ин-та металлургии и обогащения АН КазССР. 1962. Т. 5. С. 29—30.
90. **Бердоносов С. С., Лапицкий А. В., Баков Е. К.**// Журн. неорган. химии. 1965. Т. 10. Вып. 2. С. 322—324.
91. **Тарасенков Д. Н., Командин А. В.**//Журн. общ. химии. 1940. Т. 10. Вып. 14. С. 1319—1320.
92. **Клушин Д. Н., Черных В. Я.**//Журн. неорган. химии. 1960. Т. 5. Вып. 7. С. 1409—1412.
93. **Shapiro I., Ditter T. F.**//J. Chem. Phys. 1957. Vol. 26, № 4. P. 798—801.
94. **Koehler J. K., Glaugue W. F.**//J. Amer. Chem. Soc. 1958. Vol. 80, № 11. P. 2659—2662.
95. **Jarry R. L.**//J. Phys. Chem. 1957. Vol. 61, № 4. P. 498—499.
96. **Weinstock B., Malm J., Wealer E. E.**//J. Amer. Chem. Soc. 1961. Vol. 83, № 21. P. 4310—4317.
97. **Malm J. G., Selig H.**//J. Inorg. Nucl. Chem. 1961. Vol. 20, № 3/4. P. 189—190.

98. **Барышников Н. В., Зеликман А. Н., Теслицкая М. В.**//Журн. неорган. химии. 1962. Т. 7. Вып. 11. С. 2634—2635.
99. **Никольский А. Б.**//Там же. 1963. Т. 8. Вып. 5. С. 1045—1048.
100. **Никольский А. Б.**//Там же. 1965. Т. 10. Вып. 1. С. 290—291.
101. **Зорин А. Д., Девятых Г. Г., Крупнова Э. Ф. и др.**//Там же. 1964. Т. 9. Вып. 10. С. 2280—2283.
102. **Berka L.**//J. Inorg. Nucl. Chem. 1960. Vol. 14, № 3/4. P. 190—192.
103. **Щукарев С. А., Курбанов А. Р.**//Вестн. Ленингр. ун-та. Сер. Физика и химия. 1962. № 10. С. 144—145.
104. **Кудрявцев А. А., Устюгов Г. П.**//Журн. неорган. химии, 1961. Т. 6. Вып. 11. С. 2421—2422.
105. **Кудрявцев А. А., Устюгов Г. П.**//Тр. Моск. химико-технологич. ин-та им. Д. И. Менделеева. 1962. Вып. 38. С. 42—44.
106. **Machol R. E., Westrum E. F.**//J. Amer. Chem. Soc. 1958. Vol. 80, № 12. P. 2950—2952.
107. **Selig H., Malm J. G.**//J. Inorg. Nucl. Chem. 1962. Vol. 24, № 11. P. 641—643.
108. **Smith W. T., Cobble J. W., Boyd G. E.**//J. Amer. Chem. Soc. 1953. Vol. 75, № 23. P. 5773—5774.
109. **Pace E. L., Turnbull B. F.**//J. Chem. Phys. 1965. Vol. 43, № 6. P. 1953—1955.
110. **Pike F. P., Foster C. T.**//J. Chem. Engng. Data. 1959. Vol. 4, № 4. P. 305—307.
111. **McDougall L. A., Kilpatrick J. E.**//J. Chem. Phys. 1965. Vol. 42, № 7. P. 2311—2321.
112. **Langer S., Blaukenspir F. F.**//J. Inorg. Nucl. Chem. 1960. Vol. 14, № 1/2. P. 26—28.
113. **Kenesha F. J., Cubissiotti D.**//J. Chem. Phys. 1964. Vol. 40, № 1. P. 191—199.
114. **Нестеров В. Н., Пономарев В. Д.**//Изв. АН КазССР. Сер. Металлургия, обогащение и огнеупоры. 1959. Вып. 1(4). С. 80—82.
115. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
116. **Малышев В. В.**//Теплофизика высоких температур. 1974. Т. 12. С. 743—748.
117. **Comité** Consultatif de Thermometrie. 14 Session, 1982. Recommendation T1. P. T85—T86.
118. **Малышев В. В.**//Теплофизика высоких температур. 1973. Т. 11. С. 1010—1016.
119. **Clegg H. P., Rowlinson J. S., Sutton J. R.**//Trans. Farad. Soc. 1955. Vol. 51. P. 1327—1329.
120. **Малышев В. В.**//Атомная энергия. 1973. Т. 34. С. 42—45.
121. **Begun G. M.**//J. Chem. Phys. 1956. Vol. 25, № 6. P. 1279—1280.
122. **Рабинович Н. Б., Соколов Н. Н., Артюхин П. И.**//Докл. АН СССР. 1955. Т. 105, № 4. С. 762—763.
123. **Davis R. T., Schisser R. W.**//J. Phys. Chem. 1953. Vol. 57, № 9. P. 966—969.
124. **Baerstschi F.**//Nature. 1953. Vol. 171. P. 1018—1020.
125. **Севрюгова Н. Н., Уваров О. В., Жаворонков Н. М.**//Журн. физ. химии. 1960. Т. 34, № 5. С. 1004—1005.
126. **Севрюгова Н. Н., Уваров О. В., Жаворонков Н. М.**//Докл. АН СССР. 1959. Т. 126, № 5. С. 1044—1045.
127. **Теплофизические** свойства веществ: Справочник/ Под ред. Н. Б. Варгафтика. М.—Л.: Госэнергоиздат. 1956.
128. **Smith H. A., Fith K. R.**//J. Phys. Chem. 1963. Vol. 67, № 4. P. 920—921.
129. **Уваров О. В., Соколов Н. М., Жаворонков Н. М.**// Журн. физ. химии. 1962. Т. 36, № 12. С. 2699—2702.
130. **Borowitz J. L.**//J. Phys. Chem. 1962. Vol. 66, № 8. P. 1412—1414.
131. **Матвеев К. И., Уваров О. В., Жаворонков Н. М.**// Докл. АН СССР. 1959. Т. 125, № 3. С. 580—581.
132. **Девятых Г. Г., Зорин А. Д.** //Журн. физ. химии. 1956. Т. 30. Вып. 5. С. 1133—1135.
133. **Григорьев В. Н.**//Там же. 1962. Т. 36. Вып. 8. С. 1779—1780.
134. **Катальников С. Г., Андреев Б. М.**//Атомная энергия. 1961. Т. 11. С. 240—243.
135. **Armstrong G.**//J. Chem. Phys. 1953. Vol. 21. P. 1293—1296.
136. **Bigeleisen J., Roth E.**//Ibid. 1961. Vol. 35, № 1. P. 68—70.
137. **Девятых Г. Г., Сулоев Ю. Н., Зорин А. Д.**//Тр. Моск. химико-технологического ин-та по химии и хим. технологии. 1958. Вып. 1. С. 24—26.
138. **Севрюгова Н. И., Жаворонков Н. М.**//Докл. АН СССР. Т. 134, № 4. С. 875—876.
139. **Potter A. E., Ritter H. L.**//J. Phys. Chem. 1954. Vol. 58, № 11. P. 1040—1044.
140. **Bigeleisen J., Stern M. J., Von Hook W. A.**//J. Chem. Phys. 1963. Vol. 38, № 2. P. 497—504.
141. **Bigeleisen J., Ribinkar S. V., Von Hook W. A.**// Ibid. 1963. Vol. 38, № 2. P. 489.

ГЛАВА 12

ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ

Э. Б. Гельман

12.1 ВВЕДЕНИЕ

Переход вещества из твердого состояния в жидкое называется плавлением; переход из конденсированного (твердого или жидкого) состояния в газообразное (пар) — испарением. В естественных условиях плавление является равновесным процессом; испарение становится равновесным, если внешнее давление равно давлению пара. Равновесное испарение из жидкого состояния называется кипением, из твердого — сублимацией (возгонкой).

Процессы плавления, кипения и сублимации совершаются с поглощением теплоты, которая называется соответственно теплотой плавления $\Delta H_{пл}$, кипения $\Delta H_{кип}$ и сублимации $\Delta H_{субл}$ данного вещества.

12.2. ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Плавление, кипение и сублимация чистых веществ при постоянном давлении происходят при некоторой характерной для данного вещества температуре, называемой температурой плавления $T_{пл}$, кипения $T_{кип}$ и сублимации $T_{субл}$ вещества. В табл. 12.1—12.3 приведены температура и теплота плавления и кипения (или сублимации) при нормальном давлении для элементов, неорганических и органических соединений.

Таблица 12.1. **Температура t, °С, и теплота плавления и кипения (или сублимации) ΔH, кДж/моль, элементов и некоторых изотопов при нормальном давлении 101 325 Па. Выделены значения, разброс которых по различным источникам превышает 10%**

Элемент	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
Азот, N_2	—210,012	0,7207 [4]	—195,812	5,59 [10]	[10]
Азот, $^{15}N_2$	—210,96 [12]	0,7205	—195,76	5,592	[4]
Азот, $^{14}N_2$	—210,01	—	—	—	[12]
Актиний	1050	12	3297 [10]	378	[1]
Алюминий	660,24 [10]	10,8	2520	293	[1]
Америций	1180	14,4	≈2400 [11]	230	[1]
Аргон	—189,30	1,190	—185,9	6,5	[1]
Астат	302	8,8 [6]	334	90,4 [4]	[11]
Барий	727	7,53 [6]	1640 [9]	139	[1]
Бериллий	1287	13	2471	291	[1, 11]
Бор	2075	23	3700	512	[1]
Бром, Br_2	7,25	10,57	59,2	29,5	[1]
Ванадий	1917	17,6 [6]	3392	445 [1]	[11]
Висмут	217,4	11,0	1552	177	[1]
Водород, *н*-H_2	—259,19	0,117	—252,77	0,916	[1]
пара-Водород, *пара*-H_2	—259,27	0,117	—252,87	0,900	[4]
орто-Водород, *орто*-H_2	—254,52	0,197	—	—	[4]
Водородотритий, HT	—254,7	—	—249,6	—	[4]
Вольфрам	3420	35,1 [6]	5680	770	[1]
Гадолиний	1313 [9]	10,0	3280	360	[1]
Галлий	29,78 [4]	5,59 [2]	≈2300 [9, 11]	256	[1]
Гафний	2230 [10]	23,9 [6]	≈4900 [9, 11]	569	[1]
Гелий, ^4He	—271,4 (3,00 МПа)	0,007(3,00 МПа) При нормальном давлении твердая фаза отсутствует	—268,934 [9]	0,0837 [4]	[1]
Гелий-3, ^3He	—	—	—269.95	0,0478 (—271,5 °С)	[4]
Германий	237,2	37,6 [6]	2847 [10]	334	[4]
Гольмий	1474 [9]	12,4 [6]	2695 [10]	240 [1]	
н-Дейтерий, *н*-D_2	—254,42	0,197	—249,9 [10]	1,226 [4]	[1]
орто-Дейтерий, *орто*-D_2	—	—	—249,56	1,223	[4]
Дейтероводород, HD	—256,5	0,1548	—251,02	1,109(—256,5 °С)	[4]
Дейтеротритий, DT	—253,5	—	—248,9	—	[4]
Диспрозий	1409	10,9	2562 [9]	228	[1]
Европий	822 [10]	9,2	1597 [10]	147	[1]
Железо	1538 [10]	13,8	2872 [11]	350	[1]
Золото	1063,4	12,6	2877 [10]	331	[1]
Индий	156,4	3,34 [6]	2024	228	[1]
Иод, I_2	113,6	15,77 [4]	184,35 [9]	41,8	[1]
Иридий	2447	26,3 [4]	4380	613	[1]
Иттербий	824	7,7	1211	130	[1]
Иттрий	1528	11	3337 [10]	362	[1]
Кадмий	320,9 [9]	6,2	766,5	99,6	[1]
Калий	63,5 [10]	2,33	761	76,6	[1]
Кальций	842	8,66 [6]	1484 [10]	152	[1]
Кислород, O_2	—218,79 [3]	0,4459 [3]	—182,97	6,833	[1]
Кобальт	1492	16,3	2957 [11]	376	[1]
Кремний	1415 [10]	49,8	3300	356	[1]
Криптон	—157,37	1,64	—153,22	9,046	[1]
Ксенон	—111,85	2,29	—107,96 [10]	12,63	[1]
Кюрий	1340	—	—	—	[10]
Лантан	920	6,3 [6]	3454 [10]	413	[1]
Литий	180,54 [9]	3,0	1347 [9]	138	[1]
Лютеций	1663 [10]	18,8	3395 [9]	356	[1]
Магний	650	8,56 [6]	1107 [10]	128	[1]
Марганец	1245	12,1 [6]	2080	227	[1]
Медь	1083	13,0	2543	302	[1]
Молибден	2620	36	≈4700 [1, 10]	582	[1]
Мышьяк (серый)	Субл.		615,0	31,8	[1]

Элемент	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
Натрий	97,9	2,60 [6]	886	90,1	[1]
Неодим	1024	10,68	3080	255	[12]
Неон, Ne	—248,52	0,33	—245,93	1,79	[1, 10]
Неон, ^{20}Ne	—248,49	0,331	—	—	[12]
Неон, ^{22}Ne	—248,31	0,334	—	—	[12]
Нептуний	637	52	≈4000 [1, 9]	422	[1]
Никель	1455	17,6	≈2800 [9, 11]	370	[1]
Ниобий	2469 [10]	28	≈4800 [9, 11]	662	[1]
Олово (серое)	231,97 [9]	7,2	≈2450 [9, 11]	296,1	[1]
Осмий	3045	31,8 [6]	5027	748 [1]	[9]
Палладий	1554	17	≈3000 [9, 10]	353	[1]
Платина	1772	20 [1]	3827	511 [1,2]	[10]
Плутоний	639,7	2,8	≈3300	351	[1, 10]
Полоний	254	12,6 [6]	962	59	[1]
Празеодим	932	6,9	≈3360 [9, 10]	297	[1]
Прометий	≈1100	10,5 [6]	≈2600	—	[9, 11]
Протактиний	1572 [10]	16,7	≈3780 [10, 11]	481,5	[2]
Радий	700	9,2 [6]	≈1320	132 [1]	[9, 11]
Радон	—71 [10]	2,89	—61,9	16,8	[1]
Рений	3180 [10]	33,1 [6]	5627 [9]	716 [8]	
Родий	1963	21,8 [6]	≈3680 [9, 11]	496	[1]
Ртуть	—38,89	2,30	356,66	59,23	[1]
Рубидий	39,49	2,19	686,04	70	[1, 10]
Рутений	2250	24,3 [6]	≈4050 [9]	602	[1]
Самарий	1072	8,6	1778	166	[1]
Свинец	327,44 [10]	4,77	1745	178	[1]
Селен (серый)	217	6,7 [6]	685	29	
Сера (β, моноклин.)	119,3	1,72	444,6	9,2	[1]
Сера (α, ромб.)	112,8	—	444,6	9,2	[1]
Серебро	960,5	11,3 [6]	2167	251	[1]
Скандий	1541	14,2 [6]	2831 [9]	315	[1]
Стронций	768	8	1384 [9]	134	[1]
Сурьма	630,5	20,1	1634	124,4	[1]
Таллий	303,5	4,2	1457	162,4	[1, 9]
Тантал	2996 [9]	35	≈5350 [9, 11]	745	[1]
Теллур	449,8	17,5	990	51,0	[1]
Тербий	1356 [9]	10,8	3200	331	[1]
Технеций	2200	24	≈4260 [9, 11]	593	[1]
Титан	1608 [10]	15,1	3287 [9]	410	[1]
Торий	1750	16,7 [1, 6]	4790 [9]	540	[1]
Тритий, T_2	—252,53	0,23	—248,11	1,39	[1]
Туллий	1545	16,9	≈1840 [9, 11]	191	[1]
Углерод (графит)		Субл.	4200	—	[10]
Уран	1134	9,2	≈4030 [1, 10]	494	[1]
Фосфор (белый)	44,1	0,66	257	13,1	[1]
Фосфор (красный)		Субл.	429	29,8	[1]
Фосфор (черный)		Субл.	453	—	[1]
Франций	26,84 [10]	2,1 [6]	677	64	[9]
Фтор, F_2	—219,6	0,510	—188,13	6,54	[1]
Хлор, Cl_2	—101,03	6,61	—34,1	20,41	[1]
Хром	1877 [10]	16,3 [6]	2672 [9]	338	[1]
Цезий	28,5	2,10	672	67	[1]
Церий	799	5,2 [1]	≈3340 [9, 10]	409 [1]	[9]
Цинк	419,5	7,2	906,2	115,3	[1]
Цирконий	1852 [10]	14,6	4340	558	[1]
Эрбий	1525	19,9	≈2690 [9, 10]	261	[1]
Эйнштейний	860	—	—	—	[10]

Таблица 12.2. **Температура t, °С, и теплота плавления и кипения ΔH, кДж/моль, неорганических соединений при нормальном давлении 101 325 Па. Обозначения: пл — плавление, кип — кипение, субл. — сублимация (возгонка), взр. — взрывается, разл. — разлагается [1]**

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
$AcBr_3$	—	субл.	800	—	—
$AcCl_3$	802	36,0	1760	188	[2]
AcF_3	1327	33,4	2277	251	[2]
Ac_2O_3	1977	83,7	—	—	[2,3]
AgBr	424	8,8	1502	198	[4]
AgCN	350	11,5	—	—	—
AgCl	455	13,2	1557	184	[5]
$AgClO_3$	231	—	270 (разл.)		—
AgF	435	17	1147	142	[2]
AgF_2	690	18,4	1227	150,5	[2]
AgI	554	9,4	1506	143,9	[4]
$AgNO_3$	209	12,1	300 (разл.)		—
AgO	110 (взр.)		—	—	—
Ag_2O	187	15,5 (разл.)		—	[3]
Ag_3PO_4	849	—	—	—	—
Ag_2S	838	14,1	разл.	—	—
Ag_2SO_4	657	17,9	>1085 (разл.)		[4]
Ag_2Se	897	17,58	разл.	—	[6]
Ag_2Te	960	21,4	—	—	[6]
AlB_{12}	2159	—	—	—	—
$Al(BH_4)_3$	—64,5	—	44,5	30,0	[4,5]
$AlBr_3$	97,5	11,3	256,2	23,5	[4]
Al_4C_3	2100	—	—	—	[2]
$AlCl_3$	—	субл.	180,2	56,1	[2]
$AlCl_4$	—	субл.	180,1	112	[5]
AlF	827	21,8	1402	155	[2]
AlF_3	—	субл.	1272	318	[2]
AlH_3	>105 (разл.)		—	—	—
AlI_3	191	15,9	382	67	—
AlN	2227	—	—	—	[4]
Al_2O_3	2046,5	113,0	2980	485,7	[3]
$AlPO_4$	2000	—	—	—	—
Al_2S_3	1100	—	1500 (разл.)		—
AmF_3	1427	54,3	2067	276	[2]
Am_2O_3	2205	71,2	3127	356	[2,3]
$AsBr_3$	31,2	11,8	221	41,8	[4]
$AsCl_3$	—16	10,1	130	38,1	—
AsF_3	—8,5	10,4	57,8	33,5	—
AsF_5	—79,8	11,5	—52,8	—	[4]
AsH_3	—116,9	1,2	—62,5	16,7	[4]
AsI_3	141	21.8	371	56,5	—
As_4O_6					
куб.	278	48,6	457	56,1	[3]
моноклин.	314	45,2	465	96,3	[3]
октаэдр.	314	49,8	465	109,3	[3]
As_2S_3	307	—	723	86	[2]
$AuCl_3$	288	12,98	—	—	[2]
AuF	577	12,1	1200	142,0	[2]
AuZn	760	24,6	—	—	[5]
BBr_3	—46	—	89,8	29,7	—
B_4C	2450	104,7	>3500	—	[7]
BCl_3	—107,2	6,8	12,5	23,9	[4]
B_2Cl_4	—92,9	10,8	65,5	33,6	[4]
BF_3	—128	4,6	—100	17,1	—
B_2H_6	—165,6	4,5	—92,5	14,3	[4]
B_4H_{10}	—121	—	18	25,5	—
B_5H_9	48,8	—	60,0	28,9	—
$B_{10}H_{14}$	99,5	32,7	213	44	[2]
BI_3	49,9	—	209,5	41,8	—
BN (α—)	3000	—	5067	—	[7]

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
$B_3N_3H_6$	—58	—	55	29,3	—
B_2O_3	450	24,6	2124	356,3	[3]
$BaBr_2$	857	32,2	1980	232	—
$BaCO_3$	—	—	1400 (разл.)		—
$BaCl_2$	960	15,9	2050	241	—
BaF_2	1370	17,6	2250	271	—
BaH_2	1200	25	—	—	—
BaI_2	711	—	1900	—	—
$BaMoO_4$	1460	—	1730	—	—
BaO	1923	57,7	2727	259,6	[3,4]
BaO_2	450	23,9	837 (разл.)		[2,3]
Ba_2O	607	21,8	767	83,7	[3]
$Ba(OH)_2$	408	15	—	290	—
BaS	>2200	—	3000	435	[2,7]
$BaSO_4$	1350	40,6	—	—	[4]
BaSe	1780	38	—	—	—
$BaWO_4$	1475	—	1730	—	—
$BeAl_2O_4$	1870	171,5	—	—	—
$BeBr_2$	508	18	540	98	—
Be_2C	2400	75,4	2537	—	[7]
$BeCl_2$	415	15,3	550	110	—
BeF_2	800	21	1175	200	—
BeI_2	490	18	530	98	—
Be_3N_2	2200	109	—	—	—
BeO	2550	85,4	4120	489,9	[3,4]
$BeSO_4$	1100	6 (разл.)		—	—
$BiBr_3$	219	21,7	461	75	—
$BiCl_2$	163	14,7	577	83,7	[2]
$BiCl_3$	233	23,6	439	74	—
BiF_3	727	25,96	1127	117,2	[2]
BiF_5	151,4	—	230	62,3	[4]
BiI_3	407,7	32	542 (разл.)	78	—
BiO	902	15,5	1647	226	[3]
Bi_2O_3					
куб.	825	16,3	1890	—	[3]
моноклин.	817	62,8	1890	—	[3]
Bi_2S_3	685	79,4	—	—	—
Bi_2Te_3	586	118.6	—	—	[7]
BrF	—33	—	20 (разл.)	25,1	[4]
BrF_3	8,8	12,03	126	42,7	—
BrF_5	—61,3	7,4	40,8	30,6	—
CBr_4	93,6	4,0	190	38	—
CCl_4	—22,88	2,5	76,73	30,0	—
CF_4	—183,7 (0,01 МПа)	0,695 (0,01 МПа)	—128,0	12,3	—
CI_4	171	—	разл.	—	—
C_2N_2	—34,4	8,1	—21,2	23,3	—
CNI	—	субл.	139,8	59,4	[5]
CO	—205,02	0,8386	—191,50	6,044	[3]
CO_2	—	субл.	—78,515	25,23	[3]
C_3O_2	—111,3	—	7,0	25	[4]
COS	—138,2	4,73	—50,2	18,51	—
COSe	—124,4	—	—21,7	22,6	[4]
CP	—110	10,9	—	—	[4]
CS_2	—111,9	4,39	46,24	26,78	—
CSSe	—85	—	84,5	31,62	[4]
CSe_2	—45,5	—	125	33	—
CaB_6	2235	—	—	—	[7]
$CaBr_2$	742	29,1	1830	212	—
CaC_2	2300	32,2	—	—	[7]

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература	Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
$CaCO_3$ арагонит (кальцит, гекс. разл.)	50	0,19	—	—	[2]	$CrCl_2$	824	37	1330	198	—
						$CrCl_2O_2$	—96,5	—	116,7	35,9	[4]
$CaCl_2$	772	28,0	1960	225	—	CrF_2	894	19	1820	251,2	[2]
CaF_2	1418	29,7	2530	305	—	CrF_3	1100	41,8	1425	201	[2]
CaH_2	814	21	1000 (разл.)		—	CrF_2O	31,6	23,4	—	—	[4]
CaI_2	783	41,8	1760	179	—	CrO_3	187	25,5	727 (разл.)		[3]
$CaMg(CO_3)_2$	750 (разл)		—	—	—	Cr_2O_3	2234	104,7	3000	—	[3]
$CaMg(SiO_3)_2$	1392	128	—	—	—	CrS	1565	—	—	—	[7]
$CaMoO_4$	1450	—	—	—	—	CsBr	638	23,6	1290	148	—
Ca_3N_2	1195	—	—	—	—	CsCl	645	20,3	1300	138	—
$Ca(N_3)_2$	140 (взр.)		—	—	—	Cs_2CrO_4	975	36,0	—	—	—
$Ca(NO_3)_2$	561	21,3	разл.	—	[4]	CsF	703	21,7	1250	123	—
CaO	2630	52	3500	625,3	[3]	CsH	682	10,26	1252	—	[2]
$CaO_2 \cdot 8H_2O$	200	—	250 (взр.)		—	CsI	632	26	1280	133	—
$Ca(OH)_2$	580	—	—	—	—	CsI_3	215	25,1	разл.	—	—
$Ca(PO_3)_2$	984	82,9	—	—	—	$CsNO_3$	409	13,8	—	—	—
$Ca_2P_2O_7$	1358	100,8	—	—	—	CsO_2	560	20	>597 (разл.)		[3]
CaS	2525	67	—	—	[7]	Cs_2O	490	19,2	495 (разл.)		[3]
$CaSO_4$	1460	28	—	—	—	Cs_2O_2	594	22	650 (разл.)		[3]
$CaSiO_3$	1544	—	—	—	—	CsOH	343	4,6	—	—	—
$CaTiO_3$	1960	—	—	—	—	$CsSO_4$	1015	36	—	—	—
$CaWO_4$	1580	—	—	—	—	CuBr	489	7,2	1355	68,2	—
$CrZrO_3$	2350	—	—	—	—	$CuBr_2$	498	—	—	—	—
Cd_3As_2	721	74,1	—	—	[6]	CuCl	430	10,2	1212	151	[2]
CdBr	565	20,9	863	—	[2]	$CuCl_2$	596	—	—	—	—
$CdBr_2$	568	33	865	102,5	—	CuF_2	770	73,3	1387	150,7	[2]
$CdCl_2$	568	31,8	964	121	—	CuI	602	10,88	1320	130,2	[2, 6]
CdF_2	1072	22,6	1747	225,2	[2]	CuO	1336	37,3 (разл.)		—	[3]
CdI_2	388	20,7	796	122,7	[2]	Cu_2O	1242	64,23	1800 (разл.)		[3]
$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	59,4	32,6	132	—	—	CuS	1100	316,1 (разл.)		—	[2]
CdO	—	субл.	1559	225	[5]	Cu_2S	1129	11,3	—	—	—
CdS	—	субл.	1380	213,5	[2]	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	250	—	—	—	—
$CdSO_4$	1135	—	—	—	—	Cu_2Se	1113	18,0	—	—	[6]
CdSe	1252	45,2	—	—	[6]	DBr	—87,63	2,402	—66,85	17,82	[4]
CdTe	1092	57,4	—	—	[6]	DCl	—114,7	1,908	—84,75	—	[4]
CeB_6	2190	—	—	—	—	DF	—83,6	—	18,36	—	[4]
$CeBr_3$	732	—	1705	188,5	[4]	DI	—51,82	2,863	—36,2	19,72	[4]
CeC_2	2250	—	—	—	—	D_2O	3,813	6,314	101,43	45,43	[3]
$CeCl_3$	822	54	1650	199	—	D_2O_2	1,5	—	25,0	52,38	[3]
CeF_3	1432	58,5	2180	274,1	—	$DyBr_3$	881	38	1085	199	[2]
CeO_2	2600	80	—	565,2	[3]	$DyCl_3$	653	—	1539	187	—
Ce_2O_3	1920	83,7	3227	339,9	[3]	DyF_3	1160	58,6	>2200	—	—
ClF	—155,6	—	—100,1	22	—	DyI_3	983	41,9	1320	172	
ClF_3	—76,31	7,612	11,76	27,53	—	Dy_2O_3	2385	—	—	—	[3]
$ClFO_2$	—115	—	—6	29,5	[4]	$ErBr_3$	950	41,9	1460	179,6	[2]
$ClFO_3$	—147,7	3,83	—46,67	19,33	[4]	ErF_3	1146	27,5	2200	—	—
ClO_2	—59,8 (взр.)		9,7 (взр.)	26,33	[3]	ErI_3	1015	41,9	1280	167	[2]
Cl_2O	—116 (взр.)		2,2 (взр.)	25,96	[3]	$EuBr_2$	683	25,12	1880	218	[2]
Cl_2O_7	—90 (взр.)		78,8(взр.)	32,4	[3]	$EuCl_2$	854	23	2060	246	—
$CoBr_2$	678	—	927	—	—	EuF_2	1416	—	>2400	—	—
$CoCl_2$	740	38	1053	145	[4]	EuF_3	1276	—	2280	—	—
CoF_2	1202	30,1	1400	200,9	[2]	EuI_2	580	21	1775	167	[2]
CoI_2	515	—	570 (разл.)		—	F_2O	—223,85	—	—145,05	11,10	[3]
CoO	1810	50,24	2627	255,4	[3]	F_2O_2	—163,4	—	—	—	[3]
Co_2P	1386	—	—	—	[7]	FeB	1650	—	—	—	[7]
CoS	1100	—	—	—	—	$FeBr_2$	688	54	968	125	—
$CoSO_4$	1089	—	—	—	[2]	$FeBr_3$	297	—	627	—	—
CoSi	1400	67	—	—	[2]	$FeCO_3$	>490 (разл.)		—	—	—
$CoSi_2$	1327	100,2	—	—	[7]	$Fe(CO)_5$	—21	13,2	105	40,2	—
Co_2Si	1332	64,05	—	—	—	Fe_2CaO_4	1220	108	—	—	—
Co_2SiO_4	1415	—	—	—	[7]	$FeCl_2$	677	43,0	1012	125	—
CrB	2070	—	—	—	—	$FeCl_3$	307,5	38	315	30	—
Cr_3C_2	1895	—	3800	—	[7]	FeF_2	1102	33,5	1827	208,3	[2, 4]
						FeF_3	1027	50,2	1327	167,5	[2]

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
$FeH_2(CO)_4$	—70,2	—	—30	25,5	[4, 5]
FeI_2	594	75	935	111,9	[4]
$Fe_{0,95}O$	1374	31,4	2512	230,3	[3]
Fe_2O_3 магнетит	1562 (разл.)		—	—	[3]
F_2O_3 гематит	1350	—	—	—	[3]
Fe_3O_4	1583	138,16	2623 (разл.)		[3]
FeS	1193	32,4	—	—	[7]
FeS_2	1700	—	—	—	—
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	64	—	300	—	—
FeSi	1405	69	—	—	—
Fe_2SiO_4	1217	92	—	—	—
GaAs	1238	97,1	—	—	[6]
$GaBr_3$	121	11,72	279	43,55	[2]
$GaCl_2$	164	16,8	535	79,6	[2]
$GaCl_3$	78	11,5	201	62,8	[2]
GaF_3	—	субл.	952	188,4	[2]
GaH_3	—21,4	—	139 (разл.)		—
GaI_3	212	22	345	69	—
Ga_2O	652	35,6	727	83,74	[3]
Ga_2O_3	1725	92	2627	314	[3]
Ga_2S_3	1110	—	—	—	—
GaSe	960	38,9	—	—	[6]
GaTe	835	52,8	—	—	[6]
GdBr	785	33,5	1490	—	[2]
$GdCl_3$	605	40,5	1600	203,8	—
CdI_3	926	41,9	1340	167	[2]
Gd_2O_3	2322	—	—	—	[3]
$GeBr_4$	26,1	12,14	186,8	41	[2]
$GeCl_4$	—49,5	—	83,1	33	—
GeF_2	112	21,8	1552	180	[2]
GeF_4	—	субл.	—36,6	31	—
GeH_4	—165,8	0,84	—88,5	14,06	—
Ge_2H_6	—109	—	31	24,7	—
Ge_3H_8	—105,6	—	110,5	29	—
$GeHCl_3$	—71	—	75,3	33,5	[4]
GeI_4	144	—	440 (разл.)		—
GeO	—	субл.	710	209,3	[3]
GeO_2, тетр.	1086	43,96	>2352	255,4	[3]
GeO_2, гекс.	1116	17,2	2352	255	[3]
GeS	665	21	827	—	[4]
GeSe	670	32,6	разл.	—	[6]
HBO_2	236	—	—	—	—
HBr	—86,9	2,406	—66,8	17,61	[4]
HCN	—13,3	8,41	25,65	25,2	—
HCl	—114,2	2,0	—85,08	16,2	—
$HClO_4$	—101	6,93	25 (3 кПа)	39,7 (3 кПа)	—
HDO	—	—	100,85	44,67 (25 °C)	[3]
HF	—88,36	3,929	19,52	7,49	—
HI	—50,8	2,871	—35,4	19,77	—
HIO_3	110	—	—	—	—
H_2MoO_4	70	—	—	—	—
HN_3	—80	—	36	29,7	—
HNO_3	—41,6	10,5	83	30,14	[2]
H_2O	0,00	6,013	100,00	40,683	[3]
H_2O_2	—0,42	12,51	152,0	51,6 (25 °C)	[3]
H_3PO_2	26,5	13,0	>50 (разл.)		—
H_3PO_3	70,1	12,85	—	—	[4]
H_3PO_4	42,35	13,0	213 (разл.)		—
$H_4P_2O_7$	61	9,2	—	—	—
H_2S	—85,6	2,38	—60,35	18,7	—

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
H_2S_2	—89,5	7,5	70,7	35,1	[4, 5]
H_2SO_4	10,31	10,7	279,6 (разл.)		—
$H_2SO_4 \cdot H_2O$	8,48	19,5	290	—	—
H_2Se	—65,7	2,515	—41,4	19,9	—
H_2SeO_4	62,4	14,4	>65 (разл.)		—
HTO	—	—	100,8	46,89 (25 °C)	[3]
H_2Te	—51	4,2	—2	23	—
H_2WO_4	>100	—	—	—	—
$Hf(BH_4)_4$	29,0	14,2	118	40,2	[4]
$HfBr_4$	—	субл.	322	100,4	[4]
HfC	3890	—	5400	—	[7]
$HfCl_2$	727	24,7	1475	147	[2]
$HfCl_4$	—	субл.	315	103	—
HfF_2	1377	20,9	2030	203	[2]
HfF_4	—	субл.	974	226	—
HfN	3000	—	—	—	[7]
HfO_2	2780	71	—	—	[3]
$HgBr_2$	238	17,9	319	59	—
Hg_2Br_2	—	субл.	392,5	—	—
HgBrI	229	—	360	—	—
$HgCl_2$	280	19,2	302	57,8	—
Hg_2Cl_2	—	субл.	383,7	—	—
HgF_2	645	23,03	647	92,1	[2]
Hg_2F_2	570	—	разл.	—	—
HgI_2	256	18,8	353	60	—
HgO (красный)	500 (разл.)		—	—	[3]
HgS	825	—	—	—	—
$HgSO_4$	>550 (разл.)		—	—	—
$HoBr_3$	919	50,2	1336	—	—
$HoCl_3$	720	30,4	1517	190	—
HoF_3	1140	56,3	2200	—	—
HoI_3	989	41,9	1300	172	[2]
IBr	42	—	119 (разл.)		—
ICl	27,2	11,1	98 (разл.)		—
IF_5	9,4	15,9	100	41,3	[4]
IF_7	—	субл.	3,4	30,7	[5]
I_2O_4	130	—	—	—	[3]
InBr	220	24	680	92	[4]
$InBr_2$	235	—	633	82,4	[4]
$InBr_3$	—	субл.	409	123	—
InCl	225	9	590	97	—
$InCl_2$	235	14,65	523	92,1	[2]
$InCl_3$	—	субл.	500	170	—
InF	452	13,4	900	109	[2]
InF_3	1170	46,1	1377	163,3	[2]
InI	351	22	713	85	—
InI_3	210	20	447	95	—
InO	1052	16,75	1727	251,2	[3]
In_2O	327	18,84	527	67	[3]
In_2O_3	1910	83,74	3327	356	[3]
InS	692	—	850	—	—
In_2S_3	—	субл.	850	—	[6]
In_2Se_3	890	64	—	—	[6]
In_2Te_3	670	81,6	—	—	—
$IrCl_3$	442	28,1	687	100	[2]
IrF_2	1107	9,63	1730	184	[2]
IrF_6	44,1	5,0	53,6	30,5	—
IrO_2	>1100 (разл.)		—	—	[3]
Ir_2O_3	1177	41,87	1977	209,3	[3]
KBF_4	570	18,0	—	—	—
KBr	734	25,5	1407	149	—

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
KBr_2I	58	—	180 (разл.)		[5]
KCN	623	14,6	—	—	[4]
K_2CO_3	900	27,9	разл.	—	—
KCl	776	26,3	1430	152	—
$KClO_3$	357	21	—	—	—
K_2CrO_4	973	33,0	—	—	—
KF	857	29,4	1505	172	—
KHF_2	238,7	6,62	>400 (разл.)		—
$KHSO_4$	222	18	разл.	—	—
KH_2PO_4	252,6	—	—	—	—
KI	681	24,0	1340	138	—
$KMnO_4$	>200 (разл.)		—	—	—
$KMoO_4$	926	39	1400 (разл.)		—
KNO_2	438	17	разл.	—	—
KNO_3	334,5	9,80	>400 (разл.)		—
$KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	75	—	215	—	—
KO_2	380	20,52	543 (разл.)		[3]
K_2O	707	28,5	разл.		[3]
K_2O_2	490	29,31	1527	188,4	[3]
K_2O_3	430	25,54	700	104,7	[3]
KOH	405	9,4	1320	129	[4]
KPO_3	813	18,4	1320	—	—
K_3PO_4	1640	—	—	—	—
$KReO_4$	553	32	1367	—	—
K_2S	948	16,2	—	—	—
KSCN	177,0	10	500 (разл.)		—
K_2SO_4	1069	36,8	1700	—	—
K_2SeO_4	1020	—	—	—	—
K_2SiO_5	1045	35,2	—	—	—
KVO_3	522	—	—	—	—
K_2WO_4	923	31,0	—	—	—
KrF_2	20 (разл.)		—	—	—
LaB_6	2715	—	—	—	—
$LaBr_3$	783	33,5	1580	202	[2, 4]
LaC_2	2365	—	—	—	[7]
$LaCl_3$	862	54,4	1710	209	—
LaF_3	1493	41,8	2330	234	[2]
LaI_3	779	33,5	1580	167	[2]
$La_2(MoO_4)_3$	1015	—	—	—	—
La_2O_3	2217	75,4	4200	—	[3]
La_2S_3	2080	—	—	—	—
$La_2(SO_4)_3$	1150 (разл.)		—	—	—
$LiBO_2$	849	33,9	—	—	—
$Li_2B_4O_7$	920	120	—	—	—
LiBr	550	17,7	1290	107	—
Li_2CO_3	732	38	—	—	—
LiCl	610	19,7	1382	121	[4]
$LiClO_3$	129	—	300 (разл.)		—
$LiClO_4$	246,7	17,0	400 (разл.)		—
LiF	849	27,1	1681	147	[2]
Li_2GeO_3	1239	—	—	—	—
LiH	691	22	1680	213,5	[2]
LiI	469	14,6	1170	97	—
Li_2MoO_4	703	49,0	—	—	—
Li_3N	813	—	—	—	—
$LiNH_2$	375	—	430 (разл.)		—
$LiNO_3$	253,0	25,5	>600 (разл.)		[4]
Li_2O	1727	58,6	2600	234,5	[3]
LiOH	473	20,1	925 (разл.)		—
Li_3PO_4	1220	—	—	—	—
Li_2S	1370	—	—	—	—
Li_2SO_4	860	9,3	—	—	—

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
Li_2SiO_3	1201	28	—	—	—
Li_2WO_4	740	28,5	—	—	—
$LuCl_3$	925	—	1420	121	—
LuF_3	1184	30,2	2200	—	—
LuI_3	1045	46,0	1200	201	[2, 4]
Lu_2O_3	2467	—	—	—	[3]
$MgAl_2O_4$	2115	—	—	—	—
$Mg_3(BO_3)_2$	1410	—	—	—	—
$MgBr_2$	711	39	1230	151	[4]
$MgCO_3$	500 (разл.)		—	—	—
$MgCl_2$	714	43,1	1370	166	—
$MgCr_2O_4$	2350	—	—	—	—
MgF_2	1263	58	2270	274	—
MgI_2	633	26	1014	151	—
MgO	2825	77,5	3600	544,3	[3]
$Mg(OH)_2$	350	—	—	—	
$Mg_2P_2O_7$	1395	134	—	—	—
$MgSO_4$	1137	15	—	—	—
Mg_3Sb_2	1250	—	—	—	—
Mg_2Si	1085	85,83	—	—	[7]
Mg_2SiO_4	1890	66,1	—	—	—
$MgWO_4$	1360	—	—	—	—
MnAs	936	—	—	—	—
MnB_2	1988	—	—	—	[7]
$MnBr_2$	698	—	—	—	—
$MnCl_2$	650	37,7	1238	148	—
MnF_2	860	14	1640	256	—
MnF_4	387	23,8	412	67	[2]
MnI_2	638	—	—	—	—
MnO	1842	43,96	3127 (разл.)		[3]
MnO_2	847 (разл.)		—	—	[3]
Mn_2O_3	1347 (разл.)		—	—	[3]
Mn_2O_7	5,9	—	>55 (разл.)		—
α-Mn_3O_4	1590	138	2630	314	[2]
β-Mn_3O_4	1560	127,7	2627	314	[3]
MnO_3F	—38	—	60	34	[4]
MnP	1147	—	—	—	[7]
MnS	1530	26,1	—	—	[7]
$MnSO_4$	700	—	850 (разл.)		—
MnSi	1275	59,4	—	—	[7]
$MnSiO_3$	1323	34,3	—	—	[4]
$MnTiO_3$	1404	33,5	—	—	—

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$,	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
MoB	2550	—	—	—	[7]
MoB_2	2350 (разл.)		—	—	[7]
α-MoC	2600	—	—	—	[7]
β-MoC_2	2522	—	—	—	[7]
$MoCl_5$	194	18	269	54	—
MoF_4	97	31,4	617	83,7	[2]
MoF_6	17,6	4,3	33,9	27,2	—
MoF_4O	97,2	3,5	186	50	—
MoO_2	1927	67	1977 (разл.)		[3]
MoO_3	801	49,0	1257	138	[3]
$MoSi_2$	2020	—	—	—	—
NCl_3	—27	—	71 (взр.)		[5]
NF_3	—206,8	0,398	—129,0	11,55	[4]
NH_3	—77,75	5,66	—33,41	23,33	—
N_2H_4	1,54	12,66	113,5	41,6	[4]
NH_4NO_3	169,6	6,40	210 (разл.)		—
NH_4HSO_4	146,9	14,2	разл.	—	—
NH_2OH	32	16	58	47,7	[4]
NH_4SCH	149,6	—	170 (разл.)		—
NO	—163,7	2,30	—151,65	13,783	[3]
N_2O	—91,0	6,544	—88,5	16,571	[3]
N_2O_3	—101	—	—40 (разл.)		—
N_2O_4	—11,2	14,662	21	38,56	[3]
N_2O_5	—	субл.	33	56,94	[3]
NOBr	—55,5	—	—2	—	—
NOCl	—59,6	4	—5,8	25,1	—
NO_2Cl	—141	—	—14,3	25,7	—
NO_3Cl	—107	—	18	305	[4]
NOF	—132,5	—	—59,9	19,2	—
N_2S_4	21	—	100 (взр.)		—
NSF	—79	—	4,8	22,2	[4]
$NaAlSiO_4$	1526	—	—	—	—
$NaBF_4$	406	13,6	—	—	—
$NaBO_2$	966	36	1434	—	—
$Na_2B_4O_7$	742	81	>1000 (разл.)		—
NaBr	747	26,2	1392	128	[5]
NaCN	564	18	1497	156	[4]
Na_2CO_3	858	28,0	разл.	—	—
NaCl	801	28,2	1490	138	—
$NaClO_3$	263	21,3	—	—	—
Na_2CrO_4	794	24,7	—	—	—
NaF	996	33,5	1704	177	[4]
NaH	200 (разл.)		—	—	[2]
$NaHSO_4$	186	10,4	—	—	—
NaI	661	23,7	1304	1597	[4]
$NaIO_3$	422	23,7	—	—	—
Na_2MoO_4	688	22	—	—	—
$NaNH_2$	208	—	400	—	—
$NaNO_2$	284	14,9	>320 (разл.)		—
$NaNO_3$	306,5	15,1	380 (разл.)		—
NaO_2	552	26,0	1027	117	[2, 3]
Na_2O	920	29,7	1350	—	[3]
Na_2O_2	596	16,7	(разл.)	—	[3]
NaOH	322	6,4	1378	144.3	[4]
$NaPO_3$	628	17,3	—	—	—
Na_3PO_4	1510	—	—	—	—
$Na_4P_2O_7$	998	59	—	—	—
Na_2S	1168	30,1	—	—	—
NaSCN	307,5	—	—	—	—
Na_2SO_3	911	26	—	—	—
Na_2SO_4	884	24,3	890	24,07	[2]
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	32,4	79,0	разл.	—	—
$Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$	48,5	23,4	100	—	—
$Na_2S_2O_7$	402	40,8	460 (разл.)		—
Na_3Sb	1010	77	—	—	[4]
Na_2Se	875	—	—	—	—
Na_2SiF_6	846	99,6	—	—	—
Na_2SiO_3	1088	54	—	—	—
Na_2Te	1035	14	—	—	—
$NaVO_3$	630	28,3	—	—	—
Na_2WO_3	696	31	—	—	—
NbB_2	3050	—	—	—	—
$NbBr_5$	267,5	36	362	75,7	—
NbC	3613	—	4500	—	[7]
$NbCl_5$	205	33,9	247,5	52,3	—
NbF_5	79,5	12,2	234,5	51,0	—
NbN	2300	—	—	—	[7]
NbO	1940	67	—	—	[3]
NbO_2	2080	67	3527	356	[3]
Nb_2O_5	1490	103,3	2927	334,9	[3]
$NdBr_3$	683	33,5	1614	195,8	[2, 4]

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
NdC_2	2207	—	—	—	[7]
$NdCl_3$	760	50,2	1620	209	—
NdF_3	1380	54,7	2300	259	[2]
NdI_3	787	33,5	1350	172	[2]
Nd_2O_3	2212	92,1	3000	—	[3]
$NiBr_2$	—	субл.	919	224,6	—
$Ni(CO)_4$	—19,3	13,8	42,3	29,8	—
$NiCl_2$	—	субл.	970	225	—
NiF_2	1157	37,3	1877	230	[2]
NiI_2	797	—	—	—	—
NiO	1957	50,7	—	—	[3]
$Ni(OH)_2$	230	—	—	—	—
Ni_2P	1110	—	—	—	—
NiS	996	44,1	—	—	[4]
$NiSO_4$	840 (разл.)		—	—	—
NiSb	1160	—	1400 (разл.)		
Ni_2Si	1318	50,24	—	—	[4]
$NpCl_3$	802	41,9	1530	167	[2]
$NpCl_4$	538	46,1	847	117	[2]
NpF_4	827	50,2	1477	192,6	[2]
NpF_6	54,8	17,5	55,9	29,5	—
NpO_2	2560	62,8	—	—	[3]
O_3	—192,5	2,09	—111,9	15,193	[3]
$OsCl_4$	97	13,8	330	50	[2]
OsF_2	1080	15,9	1630	213	[2]
OsF_8	33,4	7	47,5	27,6	[8]
OsO_4 (желтый)	39,50	14,28	130	37,3	[3]
PBr	—40,5	—	173,3	38,7	—
PCl_3	—90,3	4,52	75,3	30,5	[4]
PF_3	—151,3	0,94	—101,4	14,6	—
PF_5	—93,7	11,9	—84,55	17,2	—
PH_3	—133,8	1,13	—87,42	14,6	—
PH_4Cl	—	субл.	—28	—	—
PH_4I	18,5	—	80	—	—
PI_3	61,0	—	227	43,9	[4]
$(PNCl_2)_3$	114	20,9	255	55,2	[4]
$(PNF_2)_3$	27,8	21,8	50,9	31,8	[4]
P_2O_3	23,9	14,07	175,4	18,84	[3]
P_2O_4	—	субл.	100	—	[3]
P_2O_5					
гекс.		субл.	359	65	—
ромб.	420	≈65	584	79,13	[3]
$(P_2O_5)_n$	562	—	588	—	[3]
$POBr_3$	55,7	—	192	45,6	—
$POCl_3$	1,2	13,1	107,2	34,5	—
POF_3	—	субл.	—39,5	37,7	—
P_4S_3	172	—	407	—	—
α-$PSCl_3$	—40,8	—	125	63,2	—
$PaCl_5$	301	39,4	380	63	[2,4]
PaF_3	1280	36,8	2280	251	[2]
PaF_5	297	28,5	587	83,7	[2]
Pa_2O_5	1777	108,9	3077	398	[3]
$PbBr_2$	370	21	893	118	—
$PbCl_2$	495	24	953	129	—
$PbCl_4$, взр. около 100°C	—7	10,0	127	34,3	[2]
PbF_2	822	11,9	1292	160,2	—
PbI_2	412	21	872	100	—
$PbMoO_4$	1070	—	—	—	—
PbO	886	25,52	1472	214	[3]
PbO_2	290 (разл.)		—	—	[3]
Pb_3O_4	830	—	—	—	[3]
$Pb(OH)_2$	145	—	—	—	—
PbS	1077	36,4	1281	229,4	[2]
$PbSO_4$	1087	40,2	—	—	[4]
PbSe	1065	49,4	—	—	[6]
PbTe	917	57,4	—	—	[6]
$PbWO_4$	1125	—	—	—	—
$PdCl_2$	678	40,6	1030	126	[2]
PdF_2	952	27,6	1730	180	[2]
PdI_2	350 (разл.)		—	—	—
PdO	877 (разл.)		—	—	[3]
PdS	950 (разл.)		—	—	—
$PdSe_2$	1000	—	—	—	—
$PmBr_3$	687	33,5	1520	188	[2]
PoCl	294	21,8	480	79,6	[2]
$PoCl_2$	—	субл.	195	—	—
PoO_2	552	23	разл.	—	—
$PrBr_3$	693	47,3	1695	167	—
PrC_2	2120	—	2500 (разл.)		[7]
$PrCl_3$	786	50,6	1630	213	—
PrF_3	1370	33,5	2330	259,6	[2]
Pr_2O_3	2127	92,1	3727	376,8	[3]
$PtCl_3$	435	—	разл.	—	—
PtF_3	852	37,3	1200	159	[2]
PtF_6	61,3	5	69,2	30	—
PtO_2	450	19,26	477 (разл.)		[3]
PtP_2	>1500	—	—	—	[7]
$PuBr_3$	681	51	1512	184	[4]
$PuCl_3$	765	56	1770	195,6	[4]
$PuCl_4$	457	39,8	790	126	[2]
PuF_2	1410	54	2280	259	[2]
PuF_3	1426	33	—	—	[4]
PuF_4	1037	58,6	1427	197	[2]
PuF_6	51,6	18,7	62,2	30,1	—
PuI_3	777	50,2	—	—	[2]
PuO	1017	30,14	2052	196,8	[3]
PuO_2	2390	62,8	3327	376,8	[3]
Pu_2O_3	2085	67	2977	314	[3]
$RaBr_2$	728	—	900	—	—
$RaCl_2$	900	25,1	1610	176	[2]
RaF_2	1330	12,6	1930	230	[2]
RbBr	692	23,3	1352	141,8	[4]
RbCl	723	23,7	1390	149	—
Rb_2CO_3	835	29	разл.	—	—
RbF	795	25,8	1430	159	—
RbI	656	22,0	1327	135	—
$RbNO_3$	312	4,6	—	—	—
RbO_2	412	17,2	567 (разл.)		[3]
Rb_2O_2	570	30,5	1010 (разл.)		[3]
RbOH	385	8,9	—	—	—
Rb_2SO_4	1070	38,4	1700	—	—
$ReCl_3$	660	50,2	830	113	[2]
$ReCl_5$	278	37,7	330	58,6	[2]
$ReCl_3O$	4,5	—	131	—	—
ReF_4	125	30,1	500 (разл.)		[2]
ReF_6	18,8	4,6	33,7	28,3	—
ReO_2	1202	50,2	2977	334,9	[3]
ReO_3	160	21,8	620	—	[3]
ReO_4	147	17,58	187	38,94	[3]
Re_2O_7	301,5	66,2	359	69,9	[3]
$RhCl_2$	780	26,4	960 (разл.)		[2]
RhF_3	1187	46,0	1427	167,5	[2]

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
Rh_2O_3	1115 (разл.)		—	—	[3]
$RuCl_3$	>500 (разл.)		—	—	—
RuF_5	101	188,4	227	56	[2]
RuO_4	25,4	10,89	100 (разл.)		[3]
RuS_2	1000 (разл.)				
S_2Br_2	—40	—	90	—	—
SCl_2	—123	—	59 (разл.)		—
S_2Cl_2	—82	—	137 (разл.)		—
SF_4	—121,0	—	—38	21,8	—
SF_6	—	субл.	—63,6	22,8	[4]
S_2F_2	—165	—	—11	22,8	—
SO_2	—75,46	7,406	—10,01	24,95	[3]
α-SO_3	—	субл.	62,2	30	—
β-SO_3	32,5	12,4	44,7	40,82	[3]
γ-SO_3	16,79	5.61	44,7	40,82	[3]
$SOBr_2$	—52	—	138	42,7	[4]
$SOCl_2$	—104,5	—	75,6	31,8	—
SOClF	—139,5	—	12,2	24,8	[4]
SOF_2	—110,5	—	—43,8	21,8	—
SOF_6	—86,0	—	—35,1	21,8	[4]
$SbBr_3$	96,6	15	289	51,2	—
$SbCl_3$	73,2	13	233	46	—
$SbCl_5$	3,0	10,0	172 (разл.)		—
SbF_3	292	16,3	319	58,6	[2]
SbF_5	8,3	—	142,7	43	—
SbH_3	—94	—	—18	21	—
SbI_3	170,5	18	401,6	61	—
Sb_2O_3	656	110	1456	37,35	[3]
Sb_2S_3	560	65,3	1160	—	[3]
Sb_2Se_3	612	77,4	—	—	[6]
Sb_2Te_3	621	100,1	—	—	[6]
$ScCl_3$	960	—	967	—	[4]
Sc_2O_3	2405	96,3	—	—	[3]
$Sc_2(SO_4)_3$	973	—	—	—	—
$SeBr_2O$	41,6	—	разл.	—	—
SeC_2	45,5	—	125	—	—
$SeCl_3$	956	67,4	975	157	—
$SeCl_4$	—	субл.	196	87,9	[2]
SeF_4	—9,5	—	107,7	47,02	[4]
SeF_6	—	субл.	—46,6	18,3	—
SeO	1102	31,82	1802	188,4	[3]
SeO_2	—	субл.	337	84,6	[3]
SeO_3	118,5	7,1	>185 (разл.)		—
$SeOCl_2$	10,8	4,23	117,6	42,7	—
$SiBr_4$	5,4	—	152,6	35	—
SiC	2540	—	2830 (разл.)		[7]
$SiCl_4$	—68,9	7,7	57.0	28,6	—
$SiCl_6$	—1,0	—	145	42	[4]
SiF_4	—	субл.	—95,25	15,4	—
SiH_4	—185	0,67	—111,9	12,4	—
Si_2H_6	—131	—	—14,5	21,3	—
Si_4H_{10}	—84,3	—	108	34,3	[5]
SiH_2F_2	—122	4	—77,8	16,3	[4]
SiI_4	120,5	—	301	50,2	[4]
Si_3N_4	—	субл.	1900	—	—
SiO	2277	50,24	—	—	[3]
SiO_2:					
кварц	1610	8,541	1997 (разл.)		[3]
кристобалит	1720	7,704	2950	573,6 (25° C)	[3]
тридимит	1680	9,002	—	—	[3]
SiS_2	1090	—	1130	—	[2]
$SmBr_2$	669	25,12	1880	—	[2]
$SmBr_3$	664	—	1645	192,9	[4]
$SmCl_2$	858	14	1950	218	
$SmCl_3$	678	33,5	1560	197	[2]
SmF_3	1400	33,5	2330	259	[2]
SmI_2	520	21	1660	167	[2]
Sm_2O_3	2320	83,74	3527	340	[3]
Sm_2S_3	1900	—	—	—	[7]
$SnBr_2$	232	7	641	97	—
$SnBr_4$	30	11	208	37	—
$SnBr_2I_2$	50	—	225	—	—
$SnCl_2$	247	12,6	670	71	—
$SnCl_4$	—33	9,16	112	37	[4]
SnF_2	212	13,8	853	113	[2]
SnF_4	447	27,6	705	92,1	[2]
SnH_4	—150	—	51,8	19,05	[4]
SnI_2	320	12,6	718	105	[4]
SnI_4	144,5	19,2	348,6	50	—
SnO	1042	26,8	1527	251,2	[3]
SnO_2	1625	47,7	2500	314	[2, 3]
SnS	881	31,6	1276	156	—
$SnSO_4$	360 (разл.)		—	—	—
SnTe	780	45,2	разл.	—	[6]
SrB_6	2235	—	5100	—	[7]
$SrBr_2$	657	10,1	1970	230	—
SrC_2	>1700	—	—	—	—
$SrCl_2$	874	16,1	2040	243	—
SrF_2	1477	28,5	2460	324	—
SrI_2	538	19,7	1900	194	—
$Sr(NO_3)_2$	645	49	—	—	—
SrO	2415	69,9	3000	534,2	[3]
SrS	>2000	—	—	—	[7]
$SrSO_4$	1605	—	—	—	—
SrSe	1600	—	—	—	—
$SrSiO_3$	1580	—	—	—	—
SrTe	1490	57	—	—	—
$SrWO_4$	1535 (разл.)		—	—	—
T_2O	4,49	—	101,6	46,05 (25° C)	[3]
$TaBr_5$	265	45,6	348,8	62,3	[4]
TaC	3985	—	5500	—	[7]
$TaCl_2$	937	28,5	1377	167	[2]
$TaCl_5$	216,5	34	236	56,1	—
TaF_5	96	12,6	229,2	51,9	—
TaI_5	365	6,7	543	75,8	[4, 5]
TaN	3087 (разл.)		—	—	[7]
Ta_2O_5:					
ромб.	1785	67	2227	—	[3]
триклин.	1872	67	2227	—	[3]
$TbCl_3$	588	—	—	—	[4]
$TcCl_5$	152	32,7	232	50,2	[2]
TcF_6	36	9,6	57	27,6	[2]
TcO_2	2127	75,4	3727	439,6	[3]
Tc_2O_7	120	47,5	311	58,8	[3]
$TeBr_4$	380	—	421	—	—
$TeCl_2$	208	14,7	328	64,1	[2]
$TeCl_4$	224	18,9	390	71,1	—
TeF_4	129,6	26,57	374,5	52,8	[4]
TeF_6	—	субл.	—38,6	27	—
TeO_2	733	29,5	1257	205,2	[3]

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Литература
ThB_6	2190	—	—	—	[7]
$ThBr_4$	679	34	857	140	—
ThC	2635	—	5000	—	[2]
$ThCl_4$	770	61	921	129	—
ThF_4	1110	18,8	1650	270,3	—
ThI_4	566	33,5	837	125	[2]
ThO	1877	54,4	2977	272,1	[3]
ThO_2	3050	90	4400	752,3	[7]
$ThSiO_4$	1975	(разл.)	—	—	—
TiB_2	2790	—	—	—	[7]
$TiBr_4$	38	12,9	231	44,4	—
TiC	3257	—	4300	—	[7]
$TiCl_2$	1035	37,7	1330	147	[2]
$TiCl_3$	730	20,9	960	124	[4]
$TiCl_4$	—24,1	10,0	136,3	35,7	—
TiF_3	1227	50,2	1400	217,7	[2]
TiF_4	—	субл.	285,5	90	—
TiI_4	155	19,8	379,5	56	—
TiN	2950	—	—	—	—
β-TiO	1780	54,43	2700	563,2	[3]
TiO_2	1870 (21,3 кПа)	67	2927	(разл.)	[3]
Ti_2O_3:					
моноклин.	1830	110,5	3027	—	[3]
гекс.	2130	—	—	—	[3]
Ti_3O_5	2177	—	3327	—	[3]
TiP	1990	(разл.)	—	—	—
TiS	1780	—	—	—	[7]
TlBr	460	16,4	824	100	—
Tl_2CO_3	269	18,4	—	—	—
TlCl	431	15,6	820	101	—
TlF	322	13,9	840	94	—
TlF_3	550	35,6	927	138	[2]
TlO_2	579	30,3	600 (1 кПа)	71,2	[3]
Tl_2O_3	717	51,9	разл.	—	[3]
TlI	441	14,7	833	(разл.)	—
$TlNO_3$	206,5	9,5	433	(разл.)	[5]
Tl_2S	448	12,6	1180	159	[2]
Tl_2SO_4	632	24	—	—	—
$TmBr_3$	945	41,9	1440	—	[2]
$TmCl_3$	845	—	—	—	[4]
TmI_3	1020	41,9	1260	167	[2]
UB_2	2385	—	—	—	[7]
UBr_3	730	46	—	—	—
UBr_4	519	72	765	126	—
UC_2	2520	—	4370	—	[7]
UCl_3	841	37,7	1780	197	[2]
UCl_4	590	50,0	792	138,2	[2]
UCl_5	287	36	417	67,9	[2]
UCl_6	179	20,9	277	50,2	[2]
UF_3	1495	37	2277	255	[2]
UF_4	1036	47,0	1417	200	[2]
UF_5	348	46,9	527	75,4	[2]
UF_6	—	субл.	56,5	47,7	—
UH_3	>250	(разл.)	—	—	—
UI_3	680	—	1750	—	—
UI_4	520	23,6	769	—	—
UO	2477	58,62	—	—	[3]
UO_2	2840	136,1	(разл.)	—	[3]
US	2462	—	—	—	[7]
US_2	1600	—	—	—	—
VC	2810	—	3900	—	—
VCl_2	1000	33,5	1375	147	[2]
VCl_4	—20,5	9,6	153	36	—
VCl_3O	—78	9,6	126,7	34,7	—
VF_3	1127	54,4	1627	230	—
VF_5	19,5	4,2	48,0	43,9	—
VN	2050	—	—	—	[7]
VO	1830	62,8	3127	293,1	[3]
VO_2	1545	57	2700	—	[3]
V_2O_3	1970	100,5	3027	(разл.)	[3]
V_2O_5	680	65,15	2052	264	—
WB	2800	—	—	—	[7]
WBr_5	295	17	392	58	—
WBr_6	309	—	>400	(разл.)	—
WBr_4O	322	61	331	55,2	—
WC	2785	—	6000	—	[7]
W_2C	2795	—	6000	—	[7]
WCl_5	248	24	287	49	—
WCl_6	283	8	340	61,5	—
WCl_4O	209,5	33	224	43	—
WF_5	107	18,8	250	48	[2]
WF_6	2,0	4,1	17,3	25,9	—
WF_4O	106	8	185,9	56	—
WO_2	1570	48,15	1850	(разл.)	[3]
WO_3	1473	73,5	1670	180	[3]
W_2Re_3	2987	—	—	—	[5]
WSi_2	2160	—	—	—	—
XeF_2	140	—	—	51 (25°C)	—
XeF_4	114	—	—	64 (25°C)	—
XeF_6	46	—	76	—	—
YBr_3	905	37,7	1324	—	[2]
YCl_3	721	31,5	1482	210	—
YF_3	1155	23,4	1502	184	[2]
YI_3	997	50,2	1300	172	[2]
Y_2O_3	2430	84	4300	—	[3]
$YbBr_2$	673	25,1	1800	—	[2]
$YbCl_2$	702	—	2033	258	—
YbF_3	1162	29,7	2200	—	—
YbI_2	772	21	1330	155	[2]
$ZnBr_2$	394	15,7	670	109,6	—
$ZnCl_2$	317	10,2	732	119	—
ZnF_2	875	41,8	1505	185	—
ZnI_2	446	17	624	(разл.)	—
ZnO	1975	—	разл.	—	—
Zn_3P_2	1193	163,2	—	—	—
ZnS	—	субл.	1182	250,2	[4,7]
$ZnSO_4$	>600	(разл.)	—	—	—
ZnSe	1520	53,6	—	—	[6]
Zn_2SiO_4	1511	—	—	—	—
ZnTe	1300	65	—	—	—
ZrB_2	3050	—	—	—	—
$Zr(BH_4)_4$	28,7	18,0	123	38,9	[4]
$ZrBr_4$	—	субл.	355	108	—
ZrC	3530	—	5100	—	[7]
$ZrCl_2$	727	26,8	1387	147	[2]
$ZrCl_4$	—	субл.	333	103,1	—
ZrF_4	—	субл.	906	261	—
ZrI_4	—	субл.	418	120	—
ZrN	2980	—	—	—	[7]
ZrO_2	2900	87,1	4300	639	[3]
$ZrSiO_4$	2430	—	—	—	—

Таблица 12.3. **Температура t, °С, и теплота плавления и кипения ΔH, кДж/моль, органических соединений при нормальном давлении 101 325 Па. Обозначения те же, что в табл. 10.2 [4,13]**

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$
транс-Азобензол	68,5	24,7	293,0	—	Валериановая кислота	—33,83	7,74	186,05	44,0
Азулен	99	19,08	234	55,84	Винилацетат	—93,2	—	73	34,4
Акриловая кислота	13	11,1	141,6	—	Гексадекан	18,6	53,36	286,8	—
Акронитрил	—83,5	—	77,3	32,6	1,5-Гексадиен	—140,7	—	59,46	28,58
Акролеин	—87,0	—	52,5	28,85	Гексаметилбензол	166,5	20,59	265	53,85
Аллиловый спирт	—129	—	97	39,96	Гексан	—95	13,03	68,95	28,85
Амиловый спирт	—79	9,795	137,3	—	2-Гексанон	—57	—	128	34,5
трет-Амиловый спирт	—8,6	4,49	102,35	—	*транс*-1, 3, 5-Гексатриен	—12	—	78,5	20,59
Анетол	21.4	16,0	234,5	—	Гексафторэтан	—94	2,69	—79	16,15
Анизол	—37,5	—	153,80	39,4	Гексахлорбензол		субл.	322	—
Анилин	—6,15	10,54	184,13	45,15	Гексахлорэтан [5]		субл.	184,4	51,0
Антрацен	216,041	28,8	340	—	1-Гексен	—139,82	9,347	63,35	28,03
Ацетальдегид	—121	3,22	20,8	27,2	*цис*-2-Гексен	—139,82	—	67,87	29,12
Ацетамид	82,3	14,2	221	—	*цис*-3-Гексен	—137,82	—	66,44	28,70
Ацетилен (этин)	—	субл.	—84	21,3	Гексиловый спирт	—46,7	15,38	158	50,63
Ацетилтиофен	10,4	15,0	213,9	47,5	1-Гексин	—131,9	—	71,3	—
Ацетон	—95,4	5,72	56,2	29,09	Гептадекан	22,0	40,48	301,8	—
Ацетонитрил	—44,9	8,91	81,5	32,8	Гептан	—90,6	14,02	98,42	31,69
Ацетофенон	19,75	16,65	202	38,8	1-Гептен	—119	12,40	93,64	—
Бензальдегид	—26	—	179,2	40,9	транс-2-Гептен	—109,48	—	98	—
Бензил	95	19,4	347,0	—	Гептиловый спирт	—34,1	18,17	176	—
Бензиловый спирт	—15,3	8,97	205,4	50,46	*втор*-Гептиловый спирт	—35,5	—	151,45	39,5
Бензоил бромистый [14]	0,0	—	218,5	—	Гептилциклогексан	—40,4	23,3	244	—
Бензоил хлористый [14]	—0,5	—	197,2	—	1-Гептин	—81	—	99,74	—
Бензол	5,51	9,837	80,099	30,76	Гидрокоричная кислота	101,5	17,7	279,8	—
Бензойная кислота	122,5	18,00	250,0	—	Гидрохинон	173,5	—	285	—
Бензонитрил	—14	9,08	190,7	45,80	Гликолевая кислота	80	8,4	78	8,8
Бензотрифторид	—29,11	—	102,3	—	Глицерин	20	18,47	290 (разл.)	
α-Бензофенон	48,21	16,7	305,9	—	Глицин	247,2 (разл.)		—	—
Бромбензол	—30,82	10,63	156,06	36,40	Дейтерометан, CD_4	—183,37	0,902	—161,2	8,276
Бромбутан	—112,4	9,241	101,6	32,53	*цис*-Декалин	—43,0	9,489	195,8	42,72
Бромметан	—93,6	5,98	3,56	23,90	Декан	—29,7	28,71	174,1	—
1-Бромпропан	—109,8	6,53	71,0	29,9	1-Децен	—66,3	13,81	170,6	—
2-Бромпропан	—89	6,53	59,4	28,4	Дециловая кислота	31,20	28,0	270	61,34
Бромуксусная кислота	49,5	—	208	54	Дециловый спирт	7	—	229	—
Бромэтан	—118,6	5,9	38,40	26,82	1, 4-Дибромбензол	87,5	20,0	220,4	—
Бромэтилен	—139,54	23,0	15,80	25,9	1,2-Дибромбутан	—65,4	—	166	—
1,2-Бутадиен	—136,19	6,961	10,85	—	Дибромметан	—52,55	4,2	97	36,0
1,3-Бутадиен (дивинил)	—108.9	7,985	—4.4	22.59	1,2-Дибромпропан	—55,2	—	140	—
Бутадиин	—36,4	—	10,3	—	1,2-Дибромэтан	9,79	10,94	131,36	36,2
Бутан	—138,35	4,660	—0,50	22,39	Дибутиловый эфир	—95,3	—	142,0	36,92
2-Бутанон	—86,9	8,48	79,53	32,8	Дивиниловый эфир	—101	7,95	28,35	26,2
1-Бутантиоль	—115,7	10,46	98,0	32,23	Диизоамиловый эфир	—	—	173,2	35,1
1-Бутен (бутилен)	—185,35	3,848	—6,3	21,92	Диизопропиловый эфир	—85,9	11,24	68	29,2
цис-2-Бутен	—139,91	7,308	3,7	23,35	Диметиламин	—92,2	5,939	7,4	26,10
транс-2-Бутен	—105,55	9,757	0,88	22,76	*N*, *N*-Диметиланилин	2,45	11,42	194,15	44,35
1-Бутин	—125,7	6,031	8,1	24,52	2,2-Диметилбутан	—99,87	0,579	49,74	26,30
2-Бутин	—32,26	9,235	27	—	2,3-Диметилбутан	—128,53	0,801	58	27,28
Бутилакрилат	—64,6	—	197,4	—	2,2-Диметил-1-Бутен	—140,0	—	55,6	27,40
Бутиламин	—50,5	—	70	27,2	3,3-Диметил-1-Бутен	—115,2	10,95	41,2	25,65
Бутилбензол	—87,99	—	183,35	—	2,3-Диметил-2-Бутен	—74,28	6,452	73,2	29,64
Бутилвиниловый эфир	—92	—	93,5	32,3	2,2-Диметилгексан	—121,18	6,799	106,84	32,3
Бутиловый спирт	—89,53	8,98	117,726	43,97	2,5-Диметилгексан	—91,2	12,86	109,0	32,8
втор-Бутиловый спирт	—114,7	—	98,5	43,56	2,2-Диметилгептан	—113,0	8,95	130,5	34,8
трет-Бутиловый спирт	25,5	6,79	82,25	39,97	1,1-Диметилгидразин	—57,2	10,07	62,5	35,0
Бутилпропионат	—89,6	—	144,5	39,6	Диметиловый эфир	—138,5	4,94	—23	21,51
Бутилформиат	—91,9	—	106,8	37,1	Диметилоксалат	49,5	21,0	163,3	30,58

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$
2,2-Диметилпентан	—123,8	4,356	79,2	29,16
3,3-Диметилпентан	—134,5	7,067	86,1	29,64
1,1-Диметилциклопентан	—69,8	10,79	87,8	30,29
1,1-Диметилциклогексан	—33,5	2,023	119,5	32,97
цис-1,2-Диметилциклогексан	—50,0	1,645	129,7	34,23
транс-1,3-Диметилциклогексан	—90,1	9,86	123,5	38,85
цис-1,4-Диметилциклогексан	—87,4	9,307	124,3	33,76
1,2-Диметоксибензол	22,7	16,0	206,1	—
Диметоксиметан	—104,8	7,97	42,5	28,6
1,4-Диоксан	11,8	12,84	101,5	35,8
Дифенил	71,0	18,6	255,2	47,95
Дифениламин	54,5	17,53	302	55,23
Дифенилметан	25,2	18,4	264,3	—
Дифениловый эфир	26,9	17,22	257,9	47,74
1,2-Дифенилэтан	53	30,5	285	—
Дифтордихлорметан (фреон-12)	—158,2	4,14	—29,8	19,61
Дифторуксусная кислота	—1,1	—	134,2	—
1,1-Дифтор-1-хлорэтан	—130,8	2,69	—9,2	22,4
Дифторхлорметан (фреон-22)	—146,5	4,12	—40,8	20,22
1,1-Дифторэтан	—117	—	—24,7	23,8
1,2-Дихлорбензол	—14	12,9	180,05	—
1,3-Дихлорбензол	—24,76	12,6	173,0	—
1,2-Дихлорбутан [14]	—80,4	—	124	—
Дихлорметан	—95,1	4,6	40	28,0
1,1-Дихлортолуол [14]	—16,1	—	214,0	—
Дихлоруксусная кислота	10,8	7,65	194,4	42,7
1,1-Дихлорэтан	—96,98	7,870	57,28	28,71
1,2-Дихлорэтан	—35,36	8,837	83,47	31,45
1,1-Дихлорэтилен	—122,1	6,51	37	26,4
цис-1,2-Дихлорэтилен	—80,5	7,205	60,3	30,23
транс-1,2-Дихлорэтилен	—50	11,98	47,5	28,88
Дихлорэтиловый эфир	—46,7	8,66	178,6	45,22
Диэтиламин	—48,0	—	55,5	28,83
N, *N*-Диэтиланилин	—38,8	—	217,0	46,32
1, 3-Диэтилбензол	—83,92	11,0	181,1	—
Диэтилкарбонат [14]	—43	—	126	31,1
Диэтиловый эфир	—116,2	6,90	34,51	26,60
Диэтилоксалат	—40,6	—	186,1	41,58
Додекан	—9,6	36,84	216,3	—
1-Додецен	—35,2	19,91	213,4	—
Додециловая кислота	43,75	36,6	302,3	57,49
Додециловый спирт [14]	24,0	—	259,0	—
1-Додецин	—19	—	215	—
Изоамилацетат	—	—	143,6	37,7
Изоамиловый спирт	—	—	132	44,60
Изоамилформиат	—93,5	—	123,2	35,8
Изобутан	—159,6	5,541	—11,73	21,3
Изобутилацетат	—98,6	—	116,2	36,7
Изобутилбутират	—80,7	—	157,5	39,0
Изобутилен	—140,4	5,93	—6,9	22,12
Изобутиловый спирт [14]	—108,0	—	107,2	43,47
Изобутилпропионат	—71,4	—	136,8	34,8
Изобутилформиат	—95,8	—	98,4	33,85
Изобутилхлорид [14]	—131,2	—	68,9	—
Изовалериановая кислота	—29,3	7,32	176,50	43,1
Изокротоновая кислота	15,5	9,12	169	—
Изомасляная кислота	—46,1	5,0	153,2	41,1
Изопентан	—159,9	5,156	27,85	24,59
Изопрен	—145,95	4,83	34,07	25,82
Изопропилацетат	—73,4	—	88	33,1
Изопропиловый спирт	—89,5	5,37	82,4	40,48
Инден	—1,8	—	182,44	—
Иодбензол	—31,33	9,75	188,4	40,80
Иодметан	—66,4	—	42,4	26,14
1-Иодпропан	—101,3	—	102,4	—
Иодэтан	—108	—	72,3	29,8
Иприт	13,5	—	215	—
α-Камфора [14]	178,4	6,82	209,2	—
Каприловая кислота	16,5	21,4	239,3	—
Каприновая кислота	31,5	—	270	—
Капроновая кислота	—1,5	15,1	205	—
Карбонил бромистый	—	—	60	30,1
Карбонил фтористый	—114	—	—83,3	16,15
Кетен	—134,1	7,53	—41	20,25
Коричная кислота	135	—	300,0	—
Коричный спирт	34	—	275,5	—
орто-Крезол	30,9	—	191,0	46,94
мета-Крезол	11,5	—	202,2	49,38
пара-Крезол	34,8	—	201,9	49,53
α-Кротоновая кислота	71,6	13,0	180,5	—
орто-Ксилол	—25,18	13,60	144,41	36,82
мета-Ксилол	—47,87	11,57	139,1	36,40
пара-Ксилол	13,26	17,1	138,35	36,07
Кумол (изопропилбензол)	—96,04	—	152,39	—
Маргариновая кислота	62,5	51,09	227	—
Масляная кислота	—5,26	11,07	163,25	42,01
Ментол	43	12,3	216	50,42
Метакриловая кислота	16	—	162,5	—
Метан	—182,48	0,938	—164	8,18
Метилакрилат	—	—	80,5	40,29
Метиламин [5]	—93,5	0,134	—6,3	25,81
3-Метиланилин	—30,4	3,89	203,35	45,61
Метилацетат	—98,0	—	57	31,20
2-Метил-1-бутен	—168,5	5,36	20	—
3-Метил-1-бутен	—133,7	7,912	38,57	25,50
Метил-*трет*-бутиловый эфир	—108,6	—	55,1	28,3
Метилбутират	—84,8	—	102,5	34,42
Метилгидразин	—52,4	10,42	25,0	40,37
2-Метилгексан	—118,27	8,87	90,0	30,66
2-Метилгептан	—109,0	10,25	117,6	33,6
2-Метилгептиловый спирт	—112,0	—	175,4	—
Метилизобутират [14]	—84,7	—	92,6	33,76
Метилмеркаптан	—123	5,9	5,96	24,6
Метилнитрат	—83,0	8,24	64,6	32,3
Метиловый спирт	—93,9	3,17	64,96	35,27
2-Метилпентан	—153,7	6,266	60,3	27,79
2-Метил-1-пентен	—135,7	—	60,7	28,20
2-Метил-2-пентен	—135,1	—	67,3	29,0

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$
2-Метил-2-пентиловый спирт	—103	—	121.1	39,3	Пропиловый спирт	—126,5	5,20	97,4	41,81
					Пропилпропионат	—75,9	—	122,3	35,6
Метилпропионат	—87,5	—	79,8	32,64	Пропилформиат	—92,9	—	81,3	31,93
Метилсилан	—156,8	—	—57,5	18,4	Пропин	—101,5	—	—23,2	23,27
3-Метилтиофен	—69,0	40,54	115,4	34,25	Пропионовая кислота	—20,8	7,53	141	30,62
Метилформиат	—99	6,7	31,5	27,89	Салициловая кислота [14]	159,5	—	256.0	—
Метилциклогексан	—126,6	6,75	100,9	31,7	Спиропентан	—107,0	6,435	39,0	33,39
Метилциклопентан	—142,4	6,23	71,8	29,3	Стеариновая кислота	71	—	374	66,11
2-Метил-3-этилпентан	—115.0	11,32	115,6	32,95	Стирол	—30,63	10,95	145,2	—
Миристиловая кислота	53,7	44.95	328	61.5	Тиобутан	—105,9	9,76	66,7	29,52
Мочевина (карбамид)	135	15,1	154 (разл.)		2-Тиопентан	—113,0	9,91	95,5	32,08
Муравьиная кислота	8,4	12,68	100,7	22,26	2-Тиопропан	—98,39	7,99	—	—
Нафталин	80,28	18,98	217,96	—	Тиофен	—38,3	5,09	84,2	31,47
1-Нафтол	96	23,47	288,0	72,27	Тетрабромметан	90,5	3,95	189,5	43,1
2-Нафтол	122	22,6	295	68,32	Тетрадекан	—5,9	45,07	253,7	—
Неопентан	—16,55	3,256	9,50	22,75	1, 2, 3,4-Тетраметилбензол	—6,25	7,046	205,0	45,02
орто-Нитроанилин	71,5	16,1	284,1	63,93					
мета-Нитроанилин	114,0	23,7	305,7	65,93	1, 2, 4, 5-Тетраметилбензол	79,24	21.0	196,8	45,52
пара-Нитроанилин	149	22,2	313,7	77,4					
Нитробензол	5,85	12,12	211,03	—	2, 2, 3,3-Тетраметилбутан	—100,7	7,54	106,5	31,6
Нитроглицерин	13	21,9	256 (взр.)						
Нитрометан	—28,55	9,7	101,2	34	Тетраметилсилан	—99,0	6,90	26,6	24,2
3-Нитротолуол	15	13,7	231,9	50,17	Тетранитрометан	14,2	—	126	38,5
2-Нитрофенол	45,5	17,4	216	—	Тетрафторэтилен	—142,5	7,71	—76,3	16,82
Нонан	—51	15,47	150,8	37,76	Тетрахлорметан	—22,99	2,5	76,54	30,0
1-Нонен	—81,37	—	146,87	—	1, 1, 1, 2-Тетрахлорэтан	—70,21	—	130,5	36,8
1-Ниниловый спирт	—5,5	—	213,5	—					
1-Нонин	—50	—	150,8	—	1, 1, 2, 2-Тетрахлорэтан	—36	—	146,2	38,7
Октан	—56,79	20,74	125,66	34,57					
1-Октен	—101,73	15,31	121,3	—	Тетрахлорэтилен	—19,0	10,5	121,0	34,7
1-Октиловый спирт	16,7	—	194,45	53,1	Тетрафторметан	—183,7	0,70	—129	12,33
2-Октиловый спирт	—31,6	—	180,8	51,5	Тетраэтилсвинец	—136,2	8,79	195 (разл.)	
1-Октин	—79,3	—	125,5	—	Тетраэтилсилан	—83,8	13,0	153,0	39,7
Олеиновая кислота	16,3	—	369	67,15	Толуол	—95,01	6,62	110,62	33,47
Пальмитиновая кислота	63	54.89	360	63.14	1, 2, 2-Трибромбутан [14]	—	—	213,8	—
Паральдегид	—12,6	13,8	128	—	Трибромметан	8,3	11,08	149,5	—
Пентадекан	10,0	34,59	270,6	—	1, 2,3-Трибромпропан	16,9	—	222,2	—
Пентадекановая кислота	52,5	43,1	158	—	1, 1, 2-Трибромэтан	—29,3	—	188,93	—
					Тридекан	—5,4	25,50	235,4	—
1,4-Пентадиен	—148,28	6,14	25,97	26,0	Тридекановая кислота	45	33,6	299,0	—
Пентан	—129,7	8,41	36,07	25,77	Триметиламин	—117,3	—	2,8	24,3
1-Пентантион	—75,7	17,49	126,6	37,02	1,2,4-Триметилбензол	—43,91	12,34	16,35	39,25
Пентафторхлорэтан	—106	1,878	—38	19,41	2,2,3-Триметилбутан	—24,19	22,01	80,88	28,95
Пентахлорэтан	—29,0	—	162	40,6	Триметилоксид	—97	6,49	46	—
1-Пентен	—138	5,81	30,0	25,20	2,2,3-Триметилпентан	—112,3	8,63	109,8	32,2
цис-2-Пентен	—151,4	7,11	36,9	—	Триметилсилан	—135,9	—	6,7	24,4
транс-2-Пентен	—136	8,39	36,3	—	1,2,4-Трихлорбензол	17,05	15,48	213,0	—
1-Пентин	—90,0	—	40,2	—	1,1,1-Трихлорпропан	—77,7	—	108,2	—
Перлагоновая кислота	15	20,3	254	—	Трихлоруксусная кислота	59,1	5,90	195,0	56,2
α-Пиколин	—66,7	9,82	129,6	37,77					
Пикриновая кислота	122,5	19,5	320	87,9	1,1,1-Трихлорэтан	—30,41	1,88	74,1	—
Пиперидин	—9,0	—	106,5	32,3	1,1,2-Трихлорэтан	—30,5	11,38	113,77	36,8
Пиридин	—41,7	8,28	115,2	35,11	Трихлорэтилен	—73	—	87	32,13
Пирролидин	—59	8,58	86,6	33,01	Трифторбромметан	—143,2	—	—59	22,7
Пропадиен (аллен)	—136	—	—34,5	20,92	Трифторметан (фреон-23)	—160	—	—82,2	18,4
Пропан	—189,7	2,52	—42,1	18,77					
1, 3-Пропандиол	—85,1	—	213,5	44,33	Трифторуксусная кислота	—15,3	—	72,4	34,7
Пропен (пропилен)	—185,2	3,00	—47,4	18,42					
Пропиламин	—83,0	—	47,8	29,05	Трифторхлорметан (фреон-13)	—181	—	—81.1	14,63
Пропилацетат	—95	—	101,8	34,74					
Пропилбутират	—97,2	—	142,7	37,2	1,1,1-Трифторэтан	—111,3	6,19	—47,31	19,8

Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$	Вещество	$t_{пл}$	$\Delta H_{пл}$	$t_{кип}$, $t_{субл}$	$\Delta H_{кип}$, $\Delta H_{субл}$
Уксусная кислота	16,64	11,73	117,8	23,7	Циклогексен	—103,5	3,293	83	—
Ундекан	—25,59	25,18	195,9	—	Циклогептан	—12	1,882	118,5	—
α-Ундекановая кислота	28,6	25,1	280	—	Циклононан	9,7	19,3	178,4	40,5
					Циклооктан	14,3	2,410	149	—
Уретан	48,5	15,2	187	—	Циклопентан	—93,9	0,609	49,3	27,2
Фенатрен	101	18,62	340	—	Циклопентанол	—19	1,54	140,8	—
Фенилгидразин	19,8	16,4	248	54	Циклопентен	—135,1	3,363	44,2	—
Фенилуксусная кислота	76,7	17,7	266,5	—	Циклопропан	—127,5	5,443	—32,7	20,5
					орто-Цимол	—71,54	—	178,15	—
Фенол	40,8	11,6	181,8	47,30	Щавелевая кислота	субл.		157	90,8
Формальдегид	—118	—	—19,3	23,3	Эйкозановая кислота	76,2	70,92	—	—
Формамид	2,6	6,7	210 (разл.)		Энантовая кислота	—7,5	15,0	223	—
Фосген	—127,8	5,69	7,56	24,40	Этан	—183,3	2,857	—88,63	14,70
Фторбензол	—41,2	11,30	85,1	31,20	Этандиаль	15	—	50,4	38
Фторбутан	—121,4	—	25,1	26,05	Этен (этилен)	—169,15	3,351	—103,71	13,54
Фтордихлорметан [5]	—135	—	9	24,0	Этилена окись	—112,5	5,173	10,5	25,53
Фторметан	—141,8	—	—78,4	17,56	Этиленгликоль	—11,5	11,6	198	57,03
Фтортрихлорметан (фреон-11)	—111	6,893	23,8	24,9	Этилендиамин	8	19,3	117,4	38,9
					Этилакрилат	—71,2	—	99,8	—
Фторхлорметан	—	—	—9,1	23,4	Этиламин	—81	—	16,6	27,30
Фтороксиметан	—138	—	—42	22,2	*N*-Этиланилин	—63,6	—	204,72	—
Фторэтан	—143,2	—	—37,7	21,07	Этилацетат	—83,578	10,98	77,06	32,26
Фторэтилен	—160,5	—	72,2	17,1	Этилбензол	—94,975	9,16	136,19	35,98
2-Фторэтиловый спирт	—26,45	—	103,5	43,9	Этилбутират	—100,8	—	121,55	36,7
Фуран	—85,6	3,80	31,4	27,04	Этилвиниловый эфир	—115,8	—	37,5	—
Фурфуриловый спирт	—14,6	—	171	—	3-Этилгексан	—	—	118,53	33,60
Фурфурол	—38,7	—	161,5	—	Этилизобутират	—88,2	—	110,1	34,43
Хинолин	—15,2	10,79	236,6	47,35	Этилизовалерат [14]	—99,3	—	135,4	—
мета-Хлоранилин	—10,4	11,63	230,6	—	Этилмеркаптан	—147,9	4,975	35,0	26,78
Хлорацетилен	—126	—	—30	22,5	Этилметиловый эфир	—	—	7,5	24,73
Хлорбензол	—45,58	9,556	131,69	35,66	1-Этилнафталин	—13,9	16,3	258,7 (разл.)	
1-Хлор-1-бромбензол [14]	16,6	—	82,7	33,1	Этилнитрат	—94,6	8,527	87,7	33,9
					Этилнитрил	—44,9	8,91	81,5	32,75
1-Хлорбутан	—123,1	—	78,44	30,9	Этиловый спирт	—113,3	5,02	78,5	38,74
Хлорметан	—97,73	6,43	—24,2	21,63	3-Этилпентан	—118,6	9,456	93,5	30,95
Хлороформ	—63,5	9,5	61,1	29,67	Этилпропиловый эфир	—	—	61,4	28,90
1-Хлорпентан	—99	—	107,8	—	Этилпропионат	—73,9	12,6	99,1	34,42
1-Хлорпропан	—122,8	5,544	46,6	27,6	Этилсилан	—179,7	—	—13,7	22,3
Хлоруксусная кислота [5]	61,2	15,85	189,35	54	2-Этилтолуол	—80,83	10,63	165,15	38,87
					4-Этилфенол	47	—	219,0	—
4-Хлорфенол	43,5	15,1	219,8	—	Этилформиат	—80,5	9,2	54,5	30,31
Хлорэтан	—136,4	4,45	12,27	24,65	Этилхлорацетат	—26,0	—	141,3	41,4
Хлорэтилен	—153,8	4,74	—13,7	20,8	Этилцианид	—91,8	6,07	97,10	31,0
2-Хлор-1-этиловый спирт	—67,5	—	128	41,4	Этилциклогексан	—111,3	8,333	131,8	34,69
					Этилциклопентан	—138,4	6,896	103,5	32,17
Циклобутан	—50	1,088	12	24,19	Этин (ацетилен)	субл.		—84	21,3
Циклогексан	6,55	2,665	80,74	30,8	Янтарный ангидрид [14]	119,6	—	261,0	—
Циклогексанол	25,2	1,70	161,4	42,4					

Таблица 12.4. Температура плавления полупроводниковых, оптических и высокотемпературных соединений, °С [30—35]. (См. также табл. 12.2)

Вещество	$t_{пл}$	Вещество	$t_{пл}$	Вещество	$t_{пл}$	Вещество	$t_{пл}$
Полупроводниковые и оптические соединения							
$AgFeSe_2$	574	$AgGaTe_2$	717	AlAs	1597	As_2Se_3	360
		$AgInS_2$	850	AlP	1500	As_2Te_3	362
$AgFeTe_2$	387	$AgInSe_2$	777	AlSb	1054	BAs	1900
		$AgInTe_2$	677	Al_2Se_3	950	$Ba_2NaNb_5O_{15}$	1430
$AgGaSe_2$	847	$AgSbSe_2$	637	Al_2Te_3	895	$BaSrNbO_6$	1480
		$AgSbTe_2$	557	AsSb	807	BiSe	607

Вещество	$t_{пл}$	Вещество	$t_{пл}$	Вещество	$t_{пл}$	Вещество	$t_{пл}$
Bi_2Se_3	707	InN	927	Nb_2C	2927	CaC_2	2300
$CaMoO_4$	1430	InP	1054	NbB_4	2900	Th_2S	2300
$Ca(NbO_3)_2$	1560	InSb	525	α-SiC	2800	Th_4S_7	2300
$Ca_5(PO_4)_3$	1705	InSe	660	TiB_2	2790	YC_2	2300
Ca_2Pb	110	InTe	696	HfO_2	2777	YB_6	2300
Ca_2Si	910	KH_2PO_4	255	W_2B	2770	W_2B_5	2300
$Ca_3(VO_4)_2$	1430	KSb	332	W_2C	2730	NbB	2280
$CdAs_2$	621	K_3Sb	812	UO_2	2730	UC_2	2250
$CdGeAs_2$	397	$LaTe_2$	727	WC	2720	VB	2250
$CdIn_2Se_4$	917	$LiNbO_3$	1250	ZrO_2	2700	ScB_2	2250
$CdIn_2Te_4$	787	$LiTaO_3$	1650	ZrB_{12}	2680	Mo_2B_2	2250
Cd_3P_2	740	Mg_2Ge	1115	$ThO_2 \cdot ZrO_2$	2680	UB_{12}	2235
CdSb	456	Mg_2Pb	650	YN	2670	SrB_6	2235
Cd_4Sb_3	460	Mg_2Sn	778	ThC_2	2656	CaB_6	2230
$CdSiP_2$	<1200	$NH_4H_2PO_4$	190	UN	2650	BaB_6	2230
$CdSnAs_2$	322	NaSb	192	ScN	2650	BP	2227
$CeGaSe_3$	1125	Nd_2S_3	1737	ThN	2630	Ba_3N_2	2220
Ce_2S_3	1617	$PbMoO_4$	1065	CaO	2600	ThB_4	2210
Ce_2Se_3	1162	Pr_2S_3	1827	BeO	2550	BaS	2205
Cu_3AsS_4	655	SmS	902	SmB_6	2540	Be_3N_5	2205
$CuFeSe_2$	574	$SnSe_2$	657	NdB_6	2540	Be_3N_2	2200
$CuFeTe_2$	467	$SrMoO_4$	1065	LaB_6	2530	$CaO \cdot ZrO_2$	2200
$CuGaSe_2$	767	SnTe	790	Ta_4Si	2510	Nd_2S_3	2200
$CuGaTe_2$	697	Y_2Te_3	1252	Ta_5Si_3	2500	CrB_2	2200
Cu_2GeS_3	932	YVO_4	1940	$CeO_2 \cdot ZrO_2$	2500	Ti_2B	2200
$CuInSe_2$	987	$ZnAs_2$	768	MgO	2500	$TiSi_2$	2200
$CuInTe_2$	697	$ZnGeAs_2$	602	UB_4	2495	CeB_6	2190
Cu_2S	1130	$ZnIn_2Se_4$	977	SrO	2460	WSi_2	2165
Cu_3SbSe	555	$ZnIn_2Te_4$	802	CeO	2450	ZrSi	2150
$CuSbTe_2$	527	ZnSb	546	Cr_2O_3	2440	ThB_6	2150
Cu_2SnS_3	837	*Высокотемпературные соединения*		TaB	2430	Mo_2B	2140
Cu_2SnSe_3	687			TaS	2425	NdS	2140
β-Cu_2Te	1111			ThS	2425	Ti_5Si_3	2120
$CuTlSe_2$	407	HfC	3890	B_4C	2425	Th_3N_4	2100
Er_2Se_3	1520	TaC	3880	Nb_2N	2420	MoB_2	2100
GaN	1227	ZrC	3530	$ZrO_2 \cdot SiO_2$	2420	GdB_6	2100
GaP	1350	NbC	3480	Y_2O_3	2410	La_2S_3	2100
GaSb	712	Ta_2C	3400	VB_2	2400	VO	2077
Ga_2Se_3	1020	HfB_2	3250	AlN	2400	V_3B_2	2070
Ga_2Te_3	790	TiN	3205	U_2C	2400	Ce_3S_4	2050
Gd_3P_2	700	TiC	3147	α-WB	2400	CrB	2050
Gd_2Se_3	450	TaB_2	3100	UB_2	2385	$MoSi_2$	2030
Gd_2Te_3	1147	TaN	3087	VN	2360	Al_2O_3	2030
$GeSe_2$	740	NbB_2	3000	MoB	2350	TiO	2020
GeTe	725	BN	3000	UC	2350	$Al_2O_3 \cdot BaO$	2000
$HgIn_2Se_4$	827	HfN	2982	Be_2C	2325	$BeO \cdot ZrO_2$	2000
$HgIn_2Te_4$	707	ZrN	2982	La_2O_3	2310	$Al_2O_3 \cdot BeO$	2000
HgSe	765	TiB_2	2980	BeB_6	2300	$Al_2O_3 \cdot MgO$	1930
HgTe	655	ThO_2	2956				
InAs	943						

Таблица 12.5. **Температура плавления (солидус) t_c, °С, сталей и промышленных сплавов. Выделены значения ликвидуса, °С**

Марка	t_c	Марка	t_c	Марка	t_c	Марка	t_c
Стали [24, 25, 26]							
Углеродистые	**1535**	Х18Н9, Х23Н18	**1410**	0Х18Н10	**1410**	Х23Н13	**1440**
Х13, Х25Т, Х28	**1500**	Х18Н9Т	**1500**	Х20Н14С2	**1400**	4Х10С2М	**1480**
Х28Л, Х34Л	1350	Х18Н10Т	**1400**				

Марка	t_c	Марка	t_c	Марка	t_c	Марка	t_c
			Бронзы [27, 28]				
Бр. А5	1056	Кадмиевая	1040	Бр. ОС10-10	**925**	Бр. ОЦС5-5-5	**955**
Бр. А7	1040	Бр. КМц3-1	970	Бр. ОС12-7	**930**	Бр. ОЦС6-6-3	967
Бр. А10	1040	Бр. КН1-3	1050	Бр. ОСН10-2-3	**1000**	Бр. ОЦС8-4-3	**1015**
Бр. АЖ9-4	1040	Бр. КС3-4	**1020**	Бр. ОФ4-0,25	1060	Бр. ОЦСН3-7-5-1	**990**
Бр. АЖМц10-3-1,5	1045	Бр. КЦ4-4	**1000**	Бр. ОЦ4-3	**1045**	Бр. С30	**975**
Бр. АЖН10-4-4	1084	Бр. Мг 0,3	1076	Бр. ОЦ 8-4	854	Серебряная	1082
Бр. АЖН11-6-6	**1135**	Бр. Мц 5	1007	Бр. ОЦ 10-2	1015	Бр. СН60-2,5	885
Бр. АЖС7-1,5-1,5	**1020**	Бр. О10	1020	Бр. ОЦС3-12-5	**1000**	Бр. СуН7-2	**950**
Бр. АМц 9-2	1060	Бр. ОС5-25	899	Бр. ОЦС 3,5-6-5	**980**	Бр. Х0, 5	1073
Бр. Б2	864	Бр. ОС8-12	940	Бр. ОЦС4-4-2,5	887	Сплав ХОТ	1075
Бр. Б2,5	930	Бр. ОС10-5	**980**	Бр. ОЦС4-4-17	**920**	Бр. Цр0,4	965
			Латуни [24, 27, 28]				
Л59	885	ЛА 67-2,5	**995**	ЛМц 58-2	865	ЛО65-1—2	**920**
Л62	898	ЛА 77-2	930	ЛМцА 57-3-1	**920**	ЛО70-1	890
Л63	900	ЛА 85-0,5	**1020**	ЛМцЖ 52-4-1	**940**	ЛО74-3	885
Л66	905	ЛАЖ 60-1-1	**904**	ЛМц 55-3-1	**930**	ЛО90-1	995
Л68	909	ЛАЖМц 66-6-3-2	**899**	ЛМцС 58-2-2	**900**	ЛС59-1	**900**
Л70	915	ЛАН 59-3-2	892	ЛМцОС 58-2-2-2	**900**	ЛС60-1	**900**
Л75	980	ЛАНКМц75-2-2,5--0,5-0,5	940	ЛН 56-3	**890**	ЛС63-3	885
Л80	965	ЛЖМц 59-1-1	885	ЛН 65-5	**960**	ЛС64-2	**910**
Л85	990	ЛК80-3	**900**	ЛО 59-1	885	ЛС74-3	**965**
Л90	1025	ЛКС65-1,5-3	870	ЛО 60-1	885	—	—
Л96	1055	ЛКС80-3-3	900	ЛО 62-1	885	—	—
			Медно-никелевые сплавы [24, 27, 28]				
Алюмель	1430	Манганин	960	Нейзильбер	965	МН95-5	1086
НМцАК2-2-1		МНМц 3-12		МНЦС 16-29-1,8		МНА13-3	**1120**
Константан МНМц 40-1,5	**1260**	Мельхиор МНЖМц 30-1-1	1170	Нихром Х20Н80	**1390**	МНЦС 17—18—1,8	**1120**
Копель МНМц 43-0.5	1220	Мельхиор МН19	1130	Ферронихром Х15Н60	**1230**	НК 0,2	**1384**
				Хромель Т НХ9,5	1435	НМ8	**1190**
Куниаль А	**1183**	Монель НМЖМц 28-2,5-1,5	1370	Хромель К НХ9	1435	НМ 56,6	**1290**
МНА 13-13				МН0,6 (ТП)	**1084**	НММц 3—12	960
Куниаль Б	1140	Нейзильбер	1080	МН5	**1120**	НМц 2,5	1440
МНА6-1,5		МНЦ 15-20		МН16 (ТБ)	1120	НМц 5	1370
			Алюминиевые сплавы [24]				
АВ (Авиаль)	543	АЛ10В	488	АМг 7	550	В-95	477
АК2	509	АМг	627	АМц	643	Д1	513
АК8	**638**	АМг3	568	АН-2,5	640	Д16	502
АЛ1	535	АМг5	**638**	АСМ	657	Д18П	510
			Магниевые сплавы [27]				
ВМ65-1	516	МЛ4	400	МЛ9, МЛ10	550	МА2	565
МЛ1	505	МЛ5	430	МЛ11	593	МА3	510
МЛ2	645	МЛ6	440	МЛ15	539	МА5	482
МЛ3	561	МЛ7	505	МА1	645	МА8	645
			Цинковые сплавы [28]				
ЦА15	**443**	ЦАМ 4-1	**390**	ЦАМ 10—2	**419**	ЦМ4	**445**
ЦАМ2-4	**470**	ЦАМ 4-3	**410**	ЦАМ 10—5	**395**	ЦОС 3—3	**411**
ЦАМ2-5	**450**	ЦАМ 8-2	**405**	ЦМ1	**422**		

Продолжение табл. 12.5

Марка	t_c	Марка	t_c	Марка	t_c	Марка	t_c
Типографские сплавы [27, 28]							
Лн1, Ст2	240	Мн, Ш3, Нт	255	Ш2	270	Ш1	330
МЛн1, Мп1, У	245	МСМ1, П2	260	Гс, МШ3	300	К	340
Припои [28, 29]							
ПМЦ 36	800	ПОССу 4-6	244	ПСр 1	225	ПСр3Кд	295
ПМЦ 48	850	ПОССу 5-1	275	ПСр 1,5	265	ПСр10	822
ПМЦ 54	876	ПОССу 10-2	268	ПСр 2	225	ПСр12М	793
ПОС40÷ПОС90	183	ПОССу 40-2	185	ПСр 2,5	300	ПСр44	650
ПОС10	268	ПОССу 18-0,5	183	ПСр 2,5С	304	ПСр65	695
ПОСК 50-18	142	ПОССу 95-5	234	ПСр 3	314	ПСр72	779
Баббиты [28]							
Б6	416	Б91	223	Б93	304	БН	400
Б83	370	Б93А	260	БК	440	БС6	280

Таблица 12.6. **Температура плавления (солидус) t_c двухкомпонентных сплавов, °С [36]**

Компонент		Содержание компонента В, %								
А	В	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Ag	Sn	870	750	630	550	495	450	420	375	300
Ag	Zn	850	755	705	690	660	630	610	570	505
Al	Ag	625	615	600	590	580	575	570	650	750
Al	Au	675	740	800	855	915	970	1025	1055	—
Al	Cu	630	600	560	540	580	610	755	930	1055
Al	Fe	860	1015	1110	1145	1145	1220	1315	1425	1500
Al	Sb	750	840	925	945	950	970	1000	1040	1010
Al	Sn	645	635	625	620	605	590	570	560	540
Al	Zn	640	620	600	580	560	530	510	475	425
Au	Ag	1062	1061	1058	1054	1049	1039	1025	1006	982
Au	Cu	910	890	895	905	925	975	1000	1025	1060
Au	Pt	1125	1190	1250	1320	1380	1455	1530	1610	1685
Cd	Ag	420	520	610	700	760	805	850	895	910
Cd	Tl	300	285	270	262	258	245	230	210	235
Cd	Zn	280	270	295	313	327	340	355	370	390
Cu	Ag	1035	990	945	910	870	830	788	814	875
Cu	Ni	1180	1240	1290	1320	1335	1380	1410	1430	1440
Cu	Sn	1055	890	755	725	680	630	580	530	440
Cu	Zn	1040	955	930	900	880	820	780	700	580
K	Tl	133	165	188	205	215	220	240	280	305
Na	Bi	425	520	590	645	690	720	730	715	570
Na	Cd	125	185	245	285	325	330	340	360	390
Ni	Sn	1380	1290	1200	1235	1290	1305	1230	1060	800
Pb	Ag	460	545	590	620	650	705	775	840	905
Pb	Cu	870	920	925	945	950	955	985	1005	1020
Pb	Na	360	420	400	370	330	290	250	200	130
Pb	Sb	250	275	330	395	440	490	525	560	600
Pb	Sn	295	276	262	240	220	190	185	200	216
Pb	Tl	710	790	880	917	760	600	480	410	425
Sb	Ag	595	570	545	520	500	505	545	680	850
Sb	Bi	610	590	575	555	540	520	470	405	330
Sb	Sn	600	570	525	480	430	395	350	310	255
Sb	Zn	555	510	540	570	565	540	525	510	470

Таблица 12.7. Температура плавления (солидус) t_c легкоплавких сплавов, °С [24, 37—39]

Сплав	t_c	Сплав	t_c
Hg97,2 Na2,8*1	—48,2	Bi50 Pb25 Sn25	93
Cs94,5 Na5,5*1	—30	Bi50 Pb31,2 Sn18,8*5	94
Cs93 Na7*1	—28	Bi50 Sn25 Cd25	95
K78 Na22*1	—11,4	Bi52,5 Pb32 Sn12,5	96
K80 Na20	—10	Bi47 Pb35,3 Sn17,7	98
Rb91,8 Na8,2*1	— 4,5	Bi40 Pb20 Sn40	100
K70 Na30	— 3,5	Bi50 Pb40 Sn10	100
K60 Na40	5	Bi50 Pb28 Sn22*6	100
K50 Na50	11	Bi54,4 Pb25,8 Sn19,8*	101
K90 Na10	17,5	Bi48 Pb28,5 Sn14,5 Hg9	105
Na56 K44*1	19	Bi42,1 Pb42,1 Sn15,8	108
Na85,2 Hg14,8*1	21,4	Bi40 Pb40 Sn20*7	113
Na60 K40	26	Bi36,5 Pb36,5 Sn27	117
Na70 K30	41	Bi33,4 Pb33,3 Sn33,3	123
Na50 Hg50	45	Bi55,5 Pb44,5*1	124
Bi47,7 In19,1 Sn8,3 Cb5,3 Pb22,6*1	47	Bi56,5 Sn43,5*1	125
Bi36 Hg30 Pb 28Cd6	48	Bi27,2 Pb44,5 Sn33,3	127
Bi42 Pb32 Hg20 Cd6	50	Bi43 Pb43 Sn13	128
Hg70 Na30	55	Bi56 Sn40 Zn4*1	130
Bi49,4 In21 Pb18 Sn11,6*1	57	Bi28,5 Pb43 Sn28,5	132
Na80 K20	58	K90 Tl10	133
Na60 Hg40	60	Hg70 K30	135
Bi53,5 Sn19 Pb17 Hg10,5	60	Bi57 Sn43*1	138
Na99 Tl1*1	64	Bi57 Tl43*1	139
Bi50,1 Pb24,9 Sn14,6 Cd10,8*2	65,5	Cd18,2 Pb30,6 Sn51,2	142
Bi50,4 Pb25,1 Sn14,3 Cd10,2*2	67,5	Pb42 Sn37	143
Bi50 Pb25 Sn12,5 Cd12,5*2	68	Bi60 Cd40*1	144
Bi50,1 Pb22,6 Sn13,3 Cd10*3	68	Bi50 Pb50	145
Na70 Hg30	70	Bi19 Pb38 Sn43	148
Bi49,5 Pb27,27 Sn13,13 Cd10,1*1	70	Bi25 Pb50 Sn25	149
Bi38,4 Pb30,8 Sn15,4 Cd15,4	71	Bi18,1 Pb36,2 Sn45,7	151
Bi33,7 In65,3*1	72	Bi16 Pb36 Sn48	155
Bi27,5 Cd34,5 Pb27,5 Sn10,5	75	Bi13,7 Pb44,8 Sn41,5*1	160
Bi50 Pb34,5 Sn9,3 Cd6,2	77	Bi10,5 Pb42 Sn47,5	160
Na90 K10	77	Bi13,3 Pb46 Sn40,1	165
Bi58 In17 Sn25*1	79	K80 Tl20	165
Bi35,3 Cd9,5 Pb35,1 Sn20,1	80	Bi12,8 Pb49 Sn38,2	172
Na80 Hg20	80	Pb32 Sn68	177
Na96,7 Au3,3*1	80	Cd32 Sn68*1	177
Na90 Hg10	90	Na70 Hg30	181
Na50 Hg50	90	Sn62 Pb38*1	183
Bi55,2 Pb33,3 Tl11,5*1	91	Bi44,2 Pb9,8 Tl48*1	186
Bi51,6 Cd8,1 Pb40,3	91	Bi47,5 Tl52,5*1	188
Bi50 Pb30 Sn20*4	92	Bi76,5 Tl23,5*1	198

*1 Эвтектический сплав.
*2 Сплав Вуда.
*3 Сплав Липовица.
*4 Сплав Лихтенберга.
*5 Сплав Ньютона.
*6 Сплав Розе.
*7 Висмутовый сплав.

Таблица 12.8. Температура размягчения $t_р$, стекол, °С [40]

Стекло	$t_р$	Стекло	$t_р$
Кварцевое:		N51-A	574
КВ, КУ, КВР	1160	Multal	670
КИ	1220	Sial	590
I	1300	Волоконное бесщелочное	830
II	1100	Волоконное натриевое	710
Лабораторное		Листовое оконное	600
N23	580	Медицинское НС-1	630
N29	565	Медицинское АБ-1	590
Ц32	590	Пеностекло	<600
N846	582	Пеностекло кремнеземистое	1100
Термостойкое:	620	Сортовое (посудное)	560
N13	680	Ситаллы СТЛ	980
Т16	680	Ситаллы СТМ, СТБ	930
Т28	645	Стекло для труб 13 в	725
Щ23	710	Стекло для труб ситалловое	1100
Ц26	730	Хрустальное (свинцовое)	530
Пирекс	565	Шлакоситаллы	950
Симакс	570		
Uninost	530		

Таблица 12.9. Температура размягчения $t_р$ пластмасс и полимеров, °С [29, 41—44]

Пластмасса	$t_р$	Пластмасса	$t_р$
Аман	180	Поликарбонаты	220
Аминопласты	100	Полиметилметакрилат	120
Асботекстолит	130	Полипропилен	152
Асбостеклотекстолит	130	Полистирол	90
Винипласт	180	Полиуретан	85
Гетинакс	150	Полиформальдегид	177
Дифлон	150	Полиэтилен	90
Древесно-слоистый пластик	150	Полиэтилентерефталат	130
Делан	150	Полиэфиры	115
Капролон	190	Премиксы	130
Капрон	215	Стеклотекстолит	250
Карбамидные смолы	75	Текстолит	140
Лавсан	155	Терилен	264
Нейлон	60	Фенопласты	135
Ниплон	330	Фенопласты ударопрочные	140
Оргстекло СОЛ	90	Фторопласт-3	125
Оргстекло 2-55	133	Фторопласт-3М	150
Пенопласт изолан	210	Фторопласт-4 (тефлон)	260
Пенопласты	140	Фторопласт-4М	220
Пенопласты эпоксидные	170	Фенилон	150
Пенополиуретаны	230	Целлофан	60
Пентапласты	160	Целлулоид	40
Полиакрилаты	65	Шеллак	80
Полиамиды	190	Эпоксидные смолы	150
Полиарилаты	190	Эпоксикремнийорганический материал КЭП	220
Поливинилфторид	196	Этролы	70
Поливинилхлорид	60	Энант	225
Полиимиды	250		

Таблица 12.10. **Температура кристаллизации (застывания) топлива, масел и гидравлических жидкостей, °С. Вещества расположеиы в порядке возрастания $t_{пл}$ [44, 22, 38]**

Вещество	t	Вещество	t
Топливо*		**Масло смазочное*2**	
Бензин Б-70	—60	МП-609	—80
Керосин	—38	МП-601	—70
Реактивное Т8	—55	МПВ	—60
Дизельное А	—55	МАС-19Н	—49
Дизельное ЗС	—45	И-12А	—30
Дизельное З	—35	И-5А (велосит)	—25
Дизельное Л	—10	И-8А (швейное)	—20
Мазут:		И-20А, И-40А	—15
топочный		И-70А, И-100А	—10
Флотский	—6	Вакуумное ВМ-1	—12
Мазут 40	10		
Мазут 100, МП	25	**Нигролы*2**	
Масло трансформаторное*2		Зимний	—20
ФМ-5	—110	ТС-14,5	—15
ФС-5	—100	Летний	—5
ФС-56	—90		
АТМ-65	—70	**Гидравлические жидкости*2**	
Гексол, ПМС-50	—60		
Т-750, Т-1500	—53	АМГ-10, МГЕ-10	—70
ТК, ТКп	—45	РМ, МГЗ	—60
С-220	—30	ЭШ	—50
ГХБД	—21	АУ, Р, АУП	—45
ТХБ	—16	МГ-30	—35
Совтол	—7	ИС-12, ОМТИ	—30
Совол	5	ИС-50	—20
Масло моторное*2		МС-20	—18
МТ-14П	—43	ИС-20	—15
МТ-16П	—25		
МС-20П	—18		
Моторное Т	0		

*1 Температура кристаллизации.
*2 Температура застывания.

Таблица 12.11. **Температура плавления $t_{пл}$ и кипеиия $t_{кип}$ хладонов, антифризов и теплоносителей, °С (хладоны приведеиы в номенклатурном порядке, остальные вещества — в порядке возрастания $t_{пл}$)** [37, 38, 45]

Марка или состав, %	$t_{пл}$	$t_{кип}$	Марка или состав, %	$t_{пл}$	$t_{кип}$
Хладоны			R116	—100,6	—78,21
R11	—111,0	23,65	R142	—138,0	—9,20
R12	—155,9	—29,74	R143a	—111,3	—47,58
R12B1	—80,0	—3,83	R152	—117	24,54
R13	—180,0	—81,59	RC318	—41,4	—5,97
R13B1	—143,2	—57,77	Антифризы		
R14	—184,0	—128,02			
R21	—135,0	8,37	ТОСОЛ-А65	—65	115
R22	—160,0	—40,81	ТОСОЛ-А40	—40	108
R23	—155,0	—82,14	ТОСОЛ-А	—35	170
R30	—96,7	40,10	Теплоносители		
R40	—97,8	—23,86			
R113	—35,0	46,82	Силикон МАИ	—100	191
R113B2	—72,9	94,57	Этиленгликоль 67; вода 33	—73	—
R114	—93,9	3,63	CaCl 29,9; вода 60,1	—55	—
R114B2	—110,5	47,15	Пропиленгликоль 60; вода 40	—50	—
R115	—106,0	—38,97			

Продолжение табл. 12.11

Марка или состав, %	$t_{пл}$	$t_{кип}$	Марка или состав, %	$t_{пл}$	$t_{кип}$
МИПД	—47	290	Дифенилметан	25,4	264,3
ТКС	—36	440	Дифениловый эфир	27,0	258,5
ТКОС	—33	457	*орто*-Терфенил 65,8; *мета*-терфенил 33,5; *пара*-терфенил 0,7	28,9	346
ЦТМ	—30	296			
Дифенилбутан	—25	295,3			
$TiCl_4$	—23	153,9	*орто*-Терфенил 66,3; мета-терфенил 33,7	29,3	345,5
NaCl 23,1; вода 76,9	—21,2	—			
ДКМ	—22	335	$TiBr_4$	39	230
Глицерин	—17,9	290	*орто*-Терфенил	56,25	337,5
Дифенилэтан	—17,9	272,6	$AlCl_3$ 22,5; $AlBr_3$ 77,5	67	200
			Дифенил	69,5	255,6
Этиленгликоль	—15,6	197,3			
Na22, K78	—11	784	$AlCl_3$ 80,7; NaCl 9,7; KCl 9,6	70	254
Дифенил 30,9; *орто*-терфенил 47,5; *мета*-терфенил 21,6	10,5	297,5	Нафталин	80,2	281,8
Na56 K44	19	825			
			мета-Терфенил	87,45	379
Дифенил 40,2; *орто*-терфенил 59,2; *пара*-терфенил	22,7	287	Bi 55,5; Pb 43,5	125	1670
			пара-Терфенил	212,7	384
Дифенил 50,5; *орто*-терфенил 59,5	23	286,5			

Многие технические материалы в твердом состоянии являются сплавами, твердыми растворами или аморфными веществами; процесс их плавления отличается от плавления чистых веществ.

Плавление сплавов и твердых растворов обычно происходит в некотором интервале температур — от нижней температуры (солидус) до верхней (ликвидус); внутри этого интервала вещество находится в гетерогенном состоянии. Исключением являются эвтектические сплавы, у которых солидус и ликвидус совпадают. В табл. 12.4—12.7 приведена температура плавления (как правило, солидус) технических материалов — полупроводниковых, оптических и высокотемпературных веществ, сталей, промышленных и специальных сплавов.

Плавление (и затвердевание) веществ, имеющих в твердом состоянии аморфную структуру, не имеет выраженной температуры перехода, оно совершается постепенно и характеризуется температурой размягчения (и соответственно застывания). В табл. 12.8, 12.9 приведена температура размягчения аморфных твердых материалов этого типа — стекол и полимерных материалов, а в табл. 12.10 — температура застывания некоторых технических жидкостей.

В табл. 12.11 приведены температуры плавления и кипения жидкостей, используемых в качестве теплоносителей и хладонов.

12.3. ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ

Процессы плавления, кипения и сублимации зависят от давления в соответствии с уравнением Клапейрона—Клаузиуса

$$dT/dP = T(\Delta V/\Delta H),$$

где T, ΔH — температура и теплота перехода; ΔV — изменение объема вещества при переходе; P — давление.

Температура кипения и сублимации всегда возрастает с увеличением давления. Зависимость $T_{кип}(P)$ и $T_{субл}(P)$ называют кривой упругости пара; соответствующие данные приведены в гл. 11.

Температура плавления также, как правило, возрастает с увеличением давления. Отклонения наблюдаются для отдельных веществ на ограниченных интервалах давления и объясняются несоответствием плотности упаковки атомов в жидком состоянии и структуры кристаллического состояния. Зависимости $T_{пл}(P)$ для элементов и некоторых неорганических и органических соединений приведены в табл. 12.12, 12.13. Там же приведены значения производной $dT_{пл}/dP$, с помощью которых можно вычислить значение $T_{пл}$ при сравнительно малых отклонениях от нормального давления (до 100—1000 МПа).

Таблица 12.12. Температура плавления элементов $t_{пл}$, °С, в зависимости от давления и производная $dt_{пл}/dP$, 10^{-2} °С/МПа, при нормальном давлении [6,15]

Элемент	$dt_{пл}/dP$	Давление, МПа							Дополнительная литература
		10	50	100	500	1000	3000	5000	
Азот	21,95	—208	—200	—190,9	—149,2	—	—	—	[16, 17]
Актиний	19,40	1052	1060	1069	1147	1244	1632	2020	—
Алюминий	6,41	661	663	667	692	724	852	981	[17]
Америций	2,50	1175	1176	1177	1185	1200	1245	—	—
Аргон	24,89	—187	—177	—166,8	—95,8	—	—	—	[16]
Астат	55,80	307	330	358	—	—	—	—	—
Барий	4,30	727	729	731	748	770	715	590	—
		500	(6 ГПа)	525	(7 ГПа)	380	(7,5 ГПа)		
Бериллий	5,00	1287	1289	1292	1312	1337	1437	1537	—
Бром	~25	—	—	—	80	170	—	—	—
Ванадий	15,7	1918	1925	1933	1995	2074	2388	2702	—
Висмут	—3,57	271	269	267,5	252	228	250	425	[16, 17]
		180	(2 ГПа)	500	(6 ГПа)				
Водород	29,60	—256	—247	—239	—198	—160	—	—	[18, 19]
Вольфрам	7,80	3347	3350	3354	3385	3424	3580	3736	[20]
Гадолиний	5,7	1312	1315	1318	1340	1369	1450	1480 (4 ГПа)	—
Галлий	—2,11	30	29	28	19	8	50	100	[17]
Гафний	17,3	2232	2238	2247	2316	2403	2749	3095	—
Гелий	25,7	—269,8	—264	—258,4	—246	(0,3 ГПа)	—	—	[17, 21]
Гелий-3	18,2	—270,7	—263	—258,4	—246,2	(0,3 ГПа)	—	—	[22]
Германий	—3,80	937	936	934	922	902	826	750	—
Гольмий	14,30	1475	1481	1488	1545	1617	1903	2189	—
Дейтерий	24,50	—252	—244	—236	—197,9	—157,7	—	—	[19]
Европий	12,80	823	828	835	886	950	1000	980	—
								960 (7 ГПа)	
Железо	3,00	1538	1539	1541	1553	1568	1628	1645	[17]
Золото	6,20	1064	1067	1070	1095	1126	1224	1336	—
Индий	5,22	157	159	162	182	205	287	380	[17]
								540 (9 ГПа)	
Иод	21,7	116	124	135	222	331	575	670	—
								(4,5 ГПа)	
Иридий	6,2	2447	2450	2453	2478	2509	2633	2757	—
Иттербий	17,0	816	823	831	902	990	1215	1230 (4 ГПа)	—
Иттрий	16,5	1529	1536	1544	1610	1693	2023	2353	—
Кадмий	5,3	321	324	326	347	374	480	586	—
Калий	17,71	64	71	78,5	127	167	240	275	[16, 17]
Кальций	14,90	843	849	857	916	985	1090	1200 (4 ГПа)	—
	800	(10ГПа)		710 (12 ГПа)					
Кислород	11,42	—218	—213	—208	—190	(0,3 ГПа)	—	—	[17]
Кобальт	3,50	1492	1494	1495	1509	1527	1597	1667	—
Кремний	—5,81	1419	1417	1414	1391	1330	1230	1110	[17]
Криптон	30,13	—154	—143	—129	—40	48	—	—	—
Ксенон	38,90	—	—93	—75	43	(0,3 ГПа)	—	—	[17]
Лантан	2,50	920	921	922	932	945	995	1045	—
Литий	3,41	181	182	184	194	204	228	242	[17]
Лютеций	15,90	1664	1671	1679	1742	1822	2140	2458	—
Магний	7,50	651	654	657	687	725	875	1025	[17]
Марганец	3,30	1245	1246	1248	1261	1278	1344	1410	—
Медь	4,69	1084	1085	1088	1107	1130	1215	1310	[17]
Молибден	0,96	2611	2611	2612	2616	2620	2640	2659	[20]
Мышьяк	5,7	818	819	823	846	860	920	940	[17]
Натрий	8,77	99	102	105,9	136	175	245	285	[16, 17]
Неодим	2,60	1024	1025	1026	1037	1050	1080	1080	—
		1075	(6 ГПа)						
Неон	13,16	—247	— 242	—235	—216	(0,3 ГПа)	—	—	[17]
Нептуний	2,30	637	638	639	648	670	720	760 (4 ГПа)	—
Никель	3,70	1455	1457	1459	1473	1492	1566	1640	—
Ниобий	16,2	2470	2477	2485	2550	2631	2955	3279	—
Олово	2,61	232	233	234	245	256	299	420	[17]
Осмий	6,50	3045	3048	3051	3077	3110	3240	3370	—
Палладий	6,40	1554	1557	1560	1586	1618	1746	1874	—

Элемент	$dt_{пл}/dP$	Давление, МПа							Дополнительная литература
		10	50	100	500	1000	3000	5000	
Платина	6,20	1749	1752	1755	1780	1811	1935	2015	[20]
Плутоний	—7,9	638	635	631	599	560	500	515	—
Празеодим	—	934	—	—	—	940	935	920	—
Прометий	31,30	1093	1105	1121	1246	1403	2029	2655	—
Протактиний	18,40	1574	1581	1590	1664	1756	2124	2492	—
Радий	21,30	842	850	861	946	1053	1479	—	—
Радон	34,60	—68	—54	—37	—	—	—	—	—
Рений	3,20	3177	3178	3180	3193	3209	3273	3337	[20]
Родий	5,90	1963	1966	1969	1992	2022	2140	2258	—
Ртуть	5,21	—38	—36	—34	—13	12,06	100	190	[16, 17]
Рубидий	21,11	41	49	57,9	115	164	235	280	[16, 17]
Рутений	6,10	2250	2253	2256	2280	2311	2433	2555	—
Самарий	6,0	1072	1075	1078	1102	1132	1180	1200	—
Свинец	7,73	328	331	335	364	398	516	612	[17]
Селен	20,76	224	233	243	317	390	605	680	[17]
Сера (ромб.)	31,30	—	135	148	226	270	630	(5,5 ГПа)	[17, 18]
Сера (моноклин.)	33,14	117	130	143	—	280	415	560	[17]
Серебро	4,90	961	963	966	985	1010	1108	1206	—
Скандий	15,10	1542	1548	1556	1616	1692	1994	2296	—
Стронций	16,50	769	776	784	850	933	1130	1160 (4 ГПа)	—
Сурьма	—0,58	630	630	630	628	624	610	589	[17]
Таллий	6,53	304	306	310	336	368	489	—	[17]
Тантал	5,40	2976	2979	2981	3003	3030	3138	3246	[20]
Теллур	4,50	450	452	454	—	460	450	510	—
Тербий	7,40	1357	1360	1363	1393	1450	1500	(2,5 ГПа)	—
Технеций	5,50	2200	2203	2205	2227	2255	2365	2475	—
Титан	15,40	1609	1616	1623	1685	1762	2070	2378	—
Торий	18,60	1752	1759	1768	—	—	—	—	—
Тритий	22,12	—250	— 243	—235	—213	(0,3 ГПа)	—	—	[17]
Углерод	19,60	3764	3772	3781	3860	3958	4350	4742	[20]
	4200	(7,5 ГПа)	3710	(8 ГПа)					
Уран	18,10	1136	1143	1152	—	1150	1170	1160	—
	1150	(7 ГПа)							
Фосфор	29,92	47	59	72,7	171,6	950	1030	(2 ГПа)	[17]
Хром	15,90	1878	1885	1893	1956	—	—	—	—
Цезий	25,93	32	42	52	98,5	160	190	170	[17, 23]
	100	(4 ГПа)							
Церий	—5,0	798	797	794	774	750	670	700	—
	750	(7,5 ГПа)							
Цинк	4,81	420	422	424	443	466	547	619	[17]
Цирконий	16,30	1880	1887	1895	1960	2042	2368	2694	—

Таблица 12.13. **Температура плавления индивидуальных соединений в зависимости от давления $t_{пл}$, °С, и производная $dt_{пл}/dP$, 10^{-2} °С/МПа, при нормальном давлении [17]**

Соединение	$dt_{пл}/dP$	Давление, МПа					
		10	50	100	500	1000	3000
Неорганические соединения							
Алюминия антимонид	—6,90	1059	1056	1053	1025	991	853
Аммиак	8,82	—77	—74	—70	—56 (0,3 ГПа)		—
Вода [6]	—7,68	—0,8	—3,84	—8,8	—7,5	26	135
		—22,0 (214,3 МПа)		—17 (357,3 МПа)		0,16 (646,4 МПа)	
Вода тяжелая, D_2O	—7,78	3	0	—5	—11(0,3 ГПа)	—	—
Вольфрама карбид [20]	0,0	2850	2850	2850	2850	2850	2850
Галлия антимонид	—5,0	699	697	695	675	650	550
Галлия арсенид	—3,4	1138	1136	1134	1121	1104	1036
Индия антимонид	—10,0	1024	1020	1015	975	925	403
	449 (5 ГПа)						
Индия арсенид	—4,29	939	938	936	918	897	811
Индия фосфид	—2,91	1060	1058	1057	1045	1031	973
Калия тетрасиликат	—6,02	764	762	759	—	—	—
Кадмия теллурид	—20,0	1043	1035	1025	945	845	—
Кремния тетрахлорид [16]	31,25	—65	—53	—38	67,7	183,8	—
Лития хлорид	24,22	607	617	629	715	810	—
Меди хлорид	—1,16	430	429	429	424	417	381
Натрия бромид	28,66	744	755	769	868	973	—
Натрия иодид	32,81	658	671	687	798	914	1245
Натрия фторид	16,08	993	1000	1007	1063	1120	—
Натрия хлорид	23,81	803	812	824	910	1004	—
Ортофосфорная кислота	8,13	43	46	50	—	—	—
Рубидия хлорид	25,01	720	729	741	815	1128	1426
Серебро азотнокислое	9,09	213	216	239	257	303	—
Синильная кислота	23,28	—12	—3	7	40 (300 МПа)		—
Углерода двуокись [16]	20,82	—55	—47	—5	21,4	75,4	93,5
Углерода дисульфид [16]	13,06	—110	—105	—74	—52	0	170
Углерода тетрахлорид [16]	40,50	—19	—3	15	128	192,1	—
Цезия хлорид	48,29	—	—	707	870	1039	—
Органические соединения							
трет-Амиловый спирт	22,02	—6	2	3	—	—	—
Анетол	21,42	25	33	43	77 (300 МПа)		
Анилин [16]	21,31	—4	4	13,1	81	143,2	—
Ацетамид [16]	14,20	83	88	93,1	128	166	—
Ацетонитрил	21,20	—42	—33	—24	44	112	—
Ацетофенон	25,05	22	32	42	78 (300 МПа)		—
Бензиловый спирт	15,38	—14	—8	0	—	—	—
Бензойный ангидрид	26,43	46	56	69	—	—	—
Бензол [16]	29,79	9	20	32,5	117	190,5	—
Бензонитрил	20,40	—11	—3	7	86	180	—
Бензофенон [16]	28,93	51	62	74,6	163	248	—
Бетол	37,15	99	112	126	166 (300 МПа)		—
Бромбензол [16]	20,50	—29	—21	—12,1	50	107,6	—
1-Бромнафталин	27,52	9	20	34	—	—	—
мета-Бромнитрофенол	23,41	56	65	77	—	—	—
Бромпропан [16]	—	—	—	—	—56	0	138
Бромтолуол	31,12	41	53	67	116 (300 МПа)		—
Бромуксусная кислота	18,45	57	64	73	—	—	—
Бромэтан	12,58	—118	—113	—107	—67	—28	80
н-Бутиловый спирт [16]	14,81	—88	—83	—76	—30	12	132
трет-Бутиловый спирт	41,35	30	44	58	97 (300 МПа)		—
Валериановая кислота	16,23	—33	—26	—18	—	—	—
Дибензил	36,42	55	68	84	—	—	—
1,4-Дибромбензол	38,51	91	106	123	—	—	—
Дибромметан [16]	—	—	27,5	34,0	—	—	—
1,2-Дибромэтан [16]	—	—	22,45	34,0	—	—	—
1,4-Диоксан	11,81	13	17	23	—	—	—
Дифениламин	28,0	57	68	80	165	213 (800 МПа)	

Соединение	$dt_{пл}/dP$	Давление, МПа					
		10	50	100	500	1000	3000
1,2-Дифенилэтан [16]	—	—	—	68,4	83,2 (200 МПа)		—
Дифенилметан	60,65	33	52	71	119 (300 МПа)		—
Дихлорметан [16]	—	—	—	—	—46	0	157
Дихлоруксусная кислота	21,74	117	126	137	—	—	—
Диэтиловый эфир	13,66	—115	—109	—102	—75 (300 МПа)		—
Додекан	24,35	—7	2	13	79	—	—
Иодтолуол	31,56	38	50	65	115 (300 МПа)		—
Камфора	127,3	189	214 (30 МПа)		—	—	—
Каприловая кислота	18,87	18	26	35	—	—	—
орто-Крезол [16]	18,13	32	39	69	86	218	—
мета-Крезол	13,73	13	19	26	—	—	—
пара-Крезол	23,08	36	45	56	97 (300 МПа)		—
Кротоновая кислота	37,29	75	82 (30 МПа)		—	—	—
орто-Ксилол	23,53	—23	—13	—1	—	—	—
мета-Ксилол	20,47	—43	—35	—25	—	—	—
пара-Ксилол	35,08	17	31	47	—	—	—
Масляная кислота	19,12	—4	4	14	—	—	—
Ментол	25,10	45	55	65	99 (300 МПа)		—
Метан	27,30	—180	—169	—155	—101 (300 МПа)		—
Метилбензоат	20,16	—10	—2	8	—	—	—
Метиловый спирт	6,13	—97	—95	—92	—79 (300 МПа)		—
Метилоксалат	22,73	57	65	76	151	—	—
Метилциклогексан	7,11	—126	—123	—119	—95	—69	—
Метилциклопентанол	18,34	37	45	54	—	—	—
Миристиновая кислота	25,60	61	70	81	116 (300 МПа)		—
Муравьиная кислота	13,21	10	15	21	40 (300 МПа)		—
Нафталин	39,4	84	99	—	—	—	—
Нафтиламин	4,93	51	52 (30 МПа)		—	—	—
1-Нафтол	24,53	98	108	120	164 (300 МПа)		—
Нитробензол [16]	23,68	8	17	27,9	107	184,5	—
Нитрометан	14,0	—27	—22	—15	—	—	—
1-Нитронафталин	4,35	59	61	63	72 (300 МПа)		—
орто-Нитротолуол	20,59	—1	7	17	92	—	—
мета-Нитротолуол	24,83	19	28	41	—	—	—
пара-Нитротолуол	29,05	55	66	79	—	—	—
орто-Нитрофенол	22,14	48	57	68	110 (300 МПа)		—
мета-Нитрофенол	19,83	98	106	115	151 (300 МПа)		—
пара-Нитрофенол [16]	27,26	115	125,5	137,1	198,8 (400 МПа)		—
Нонан	13,33	—52	—47	—40	8	96	205
Октадекан	25,73	30	40	51	119	—	—
Пальмитиновая кислота	20,75	66	74	84	—	—	—
Пентадекан	31,77	13	25	124	—	—	—
Пентахлорэтан	22,56	—27	—18	—6	—	—	—
Пиперидин	17,30	—9	—2	6	—	—	—
Пропилбромид	12,76	—109	—104	—98	—53	—6	142
Пропионовая кислота	22,50	—19	—10	0	—	—	—
Салол	26,90	44	55	68	—	—	—
Тетракозан	25,31	53	58 (30 МПа)		—	—	—
Тимол	22,85	54	62	71	97 (300 МПа)		—
Тиофен	54,69	—33	—14	6	105	—	—
орто-Толуидин	18,80	—14	—7	3	59	—	—
пара-Толуидин [16]	25,55	46	56	68	153	204,9 (800 МПа)	
Трибромметан [16]	25,66	10	20	31,5	115	194	—
Тридекан	24,78	12	21	32	101	—	—
Трифенилметан	38,05	96	110	126	178 (300 МПа)		—
Уксусная кислота [16]	24,70	19	28	37,7	119	148,3	—
Уретан	114,6	59	103	156	81	176	—
Фенол [16]	14,7	42	48	53,4	115,48	184,6	—
Формамид	9,54	4	7	12	—	—	—
Хлорбензол [16]	18,89	—44	—36	—28	25	84,5	222 (2,5 ГПа)
мета-Хлорнитрофенол	24,27	47	57	68	—	—	—
Хлороформ [16]	16,56	—62	—55	—47	17	79	243 (2,5 ГПа)

Продолжение табл. 12.13

Соединение	$dt_{пл}/dP$	Давление, МПа					
		10	50	100	500	1000	3000
Хлорголуол	27,81	11	21	34	78 (300 МПа)		—
Хлоруксусная кислота [16]	17,34	63	71	80	128	165	—
Цетиловый спирт	23,84	51	61	72	—	—	—
Циклобутанон	24,42	—49	—39	—28	13 (300 МПа)		—
Циклогексан	54,12	12	33	59	—	—	—
Циклогексанол	40,82	30	46	66	—	—	—
Энантовая кислота	18,27	—6	2	11	—	—	—
Этилацетат	11,34	—82	—78	—73	—35	5	119
Этиловый спирт [16]	9,14	—116	—113	—108	—75	—38	82

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Свойства** неорганических соединений: Справочник/ А. И. Ефимов и др. Л.: Химия. 1983.

2. **Термодинамические** свойства неорганических веществ/У. Д. Веретенин и др. Под ред. А. Н. Зефирова. М.: Атомиздат. 1965.

3. **Физико-химические** свойства окислов: Справочник/ Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия. 1978.

4. **Landolt-Börnstein** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Astronomie, Technik. 4 Teil. Berlin: Springer-Verlag. 1961.

5. **Selected** Values of Chemical Thermodinamic properties. Circular NBS, N° 500, Washington. 1952.

6. **Регель А. Р., Глазов В. М.** Периодический закон и физические свойства электронных расплавов. М.: Наука. 1978.

7. **Самсонов Г. В., Виницкий И. М.** Тугоплавкие соединения: Справочник.— 2-е изд. М.: Металлургия. 1976.

8. **Некрасов Б. В.** Основы общей химии. — 3-е изд. М.: Химия. 1973. Т. 1, 2.

9. **Nuclear** Wallet Cards/Ed. V. S. Shirley, C. U. Lederer. N. Y. 1979.

10. **Свойства** элементов: Справочник/Под ред. М. Е. Друц. М.: Металлургия. 1985.

11. **Термические** константы веществ. Вып. 1—10/Под ред. В. П. Глушко. М.: Изд-во АН СССР. 1965—1982.

12. **Убеллоде А.** Плавление и кристаллическая структура: Пер. с англ./Под ред. А. И. Китайгородского. М.: Мир. 1969.

13. **Свойства** органических соединений: Справочник/ Под ред. А. А. Потехина. Л.: Химия. 1984.

14. **Кэй Дж., Лэби Т.** Справочник физика-экспериментатора: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1949.

15. **Cannon J. F.**//Phys. and Chem. Ref. Data. 1974. Vol. 3, № 3. P. 781—824.

16. **Справочник** химика. — 3-е изд./Под ред. Б. П. Никольского. Л.: Химия, 1971. Т. 1.

17. **Babb S.**//Rews. Mod. Phys. 1963. Vol. 35, № 2. P. 400—412.

18. **Vezzoli G. C., Wilsh P. J.**//High Temp.—High Press. 1977. Vol. 9, № 3. P. 345—349.

19. **Liebenberg D. H. e. a.**//Phys. Rev. B. 1978. Vol. 15, № 9. P. 4526—4532.

20. **Vereshchagin L. F., Fateeva N. S.**//High Temp.— High Press. 1977. Vol. 9, № 6. P. 619—628.

21. **Свенсон К.** Физика высоких давлений: Пер. с англ./Под ред. Л. Ф. Верещагина. М.: Изд-во иностр. лит. 1963.

22. **Товарные** нефтепродукты. Свойства и применение: Справочник/Под ред. В. М. Школьникова. М.: Химия. 1978.

23. **Vaidya S. N.**//High Temp.—High Press. 1979. Vol. 11, № 3. P. 335—338.

24. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. — 1-е изд. М.: Атомиздат, 1976.

25. **Фокин М. Н., Русков Ю. С., Мосолов А. В.** Тантан и его сплавы в химической промышленности. Л.: Химия, 1978.

26. **Справочник** литейщика/Под ред. Н. Н. Рубцова. М.: Гостехтеориздат. 1962.

27. **Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В.** Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник.— 3-е изд. М.: Металлургия. 1974.

28. **Орлов И. Д., Миронов В. М.** Справочник литейщика М.: Гостехтеориздат. 1960.

29. **Анурьев В. И.** Справочник конструктора-машиностроителя. — 6-е изд. М.: Машиностроение. 1982. Т. 1—3.

30. **Кристаллохимические,** физико-химические и физические свойства полупроводниковых веществ/Г. Б. Бокий и др. М.: Изд-во стандартов. 1973.

31. **Рябцев Н. Г.** Материалы квантовой электроники. М.: Радио, 1972.

32. **Кузьминов Ю. С.** Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука. 1982.

33. **Кузьминов Ю. С.** Ниобат и танталат лития. М.: Наука. 1975.

34. **Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю.** Теплофизические свойства неметаллических материалов (окислы) Л.: Энергия. 1976.

35. **Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю.** Теплофизические свойства неметаллических материалов (карбиды). Л.: Энергия. 1977.

36. **Smithsonian** Physical Tables. 9th ed. Washington. 1954.

37. **Канаев А. А., Копп И. З.** Неводяные пары в энергомашиностроении. М.: Машиностроение. 1973.

38. **Негорючие** теплоносители и гидравлические жидкости: Справочное руководство/Под ред. А. М. Сухотина. Л.: Химия. 1979.

39. **Коган В. А.** Справочник по металлам и сплавам для полиграфистов. М.: Книга. 1976.

40 **Стекло:** Справочник/Под ред. Н. М. Павлушкина. М.: Стройиздат. 1973.

41. **Калинчев Э. Л., Саковцева М. Б.** Свойства и переработка термопластов: Справочное пособие. Л: Химия. 1983.

42. **Кацнельсон М. Ю., Балаев Г. А.** Пластические массы. Свойства и применение: Справочник. — 3-е изд. Л.: Химия, 1978.

43. **Кацнельсон М. Ю., Балаев Г. А.** Полимерные материалы: Справочник. Л.: Химия, 1982.

44. **Справочник** по электротехническим материалам.— 2-е изд./Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тараева. Л.: Энергия. 1976.

45. **Перельштейн И. И., Парушин Е. Б.** Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1984.

ГЛАВА 13

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ

Э. Б. Гельман

13.1 УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Уравнением состояния называют уравнение $f(P, V, T)=0$, отражающее функциональную связь между температурой T, давлением P и объемом V вещества в состоянии термодинамического равновесия. В настоящее время теоретически обоснованные формы уравнения состояния получены только для вещества в твердом кристаллическом и газообразных состояниях.

Уравнение состояния твердого тела наиболее разработано в форме уравнения Ми — Грюнейзена [1]

$$PV = P_0V + 2\gamma E,$$

где P_0 — давление при $T=0$; γ — постоянная Грюнейзена; E — тепловая энергия кристаллической решетки.

Значение P_0 определяется структурой решетки и потенциалом взаимодействия ее частиц и для некоторых веществ может быть записано в виде

$$P_0 = Ar^{-2}\exp\{b(1-r)\} - Kr^{-m},$$

где $r=(V/V_0)^{1/3}$ (V_0 — объем тела при нормальных условиях, м^3; параметр $m=4$ для молекулярных кристаллов и $m=9$ для ионных кристаллов и нещелочных и других металлов с сильным перекрытием электронных оболочек; параметры A, K и b определяются из эксперимента и для ряда веществ приведены в табл. 13.1.

Слагаемое $2\gamma E$ в уравнении Ми — Грюнейзена учитывает влияние температуры; его значение может быть сравнимо со значением P_0V, а при высоких температурах и превосходить его.

Постоянная Грюнейзена [2] $\gamma=\beta V/k_TC_V$, где β — объемный коэффициент температурного расширения; C_V — теплоемкость тела при постоянном объеме; k_T — изотермический коэффициент сжимаемости, слабо зависит от температуры и объема. Тепловая энергия решетки в первом приближении равна $E=(3/2)RT$ (для одного моля вещества), ее значение может уточняться в рамках теории твердого тела (Дебая, Эйнштейна и др.).

13.2. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ГАЗА

Единственной теоретически обоснованной формой уравнения состояния газа является вириальное уравнение состояния [3]

$$PV/RT = 1 + B/V + C/V^2 + \ldots, \qquad (1)$$

где V — объем одного моля газа, см^3/моль; R — газовая постоянная; B, см^3/моль; C, см^6/моль^2 — второй, третий и т. д. вириальные коэффициенты, которые зависят от температуры и не зависят от давления и плотности газа. При малой плотности ($V\to\infty$) уравнение (1) вырождается в уравнение состояния идеального газа $PV=RT$; второе, третье слагаемые и т. д. описывают по-

Таблица 13.1. **Постоянная Грюнейзена и параметры уравнения состояния Ми—Грюнейзена некоторых веществ (γ_s — постоянная Грюнейзена при степени сжатия $s=V/V_0$)**

Вещество	γ_1	$\gamma_{0,6}$	A, 10^{10} Па	b	K, 10^{10} Па
Металлы и полупроводники					
Ag	2,47	1,9	2,6887	13,5293	2,8691
Al	2,13	1,6	2,4433	10,9916	2,6180
Au	3,05	2,6	8,8721	7,9029	9,0935
Be	1,17	1,0	1,7918	19,9553	2,0571
Cd	2,27	1,6	24,9938	2,5933	24,9224
Co	1,99	1,6	90,2906	2,6438	90,5267
Cu	2,04	1,6	5,2703	9,9448	5,4910
Fe	1,68	1,3	9,9743	7,0985	10,1639
Ge	0,72	0,4	4,5765	7,1077	4,6185
In	2,24	2,0	1,2274	11,5108	1,3320
Mg	1,46	1,1	2,8386	5,7902	2,9191
Mo	1,58	1,2	15,8570	7,0914	15,9899
Nb	1,68	1,4	19,8079	4,6213	19,9267
Ni	1,91	1,4	4,7646	13,9474	4,9922
Pb	2,78	2,4	1,7719	9,3517	1,8836
Pd	2,18	1,4	5,4307	12,3419	5,6172
Pt	2,63	2,2	13,6590	8,3348	13,8758
Rh	2,26	2,0	27,3303	5,3840	27,5471
Sb	0,86	0,2	1,0437	13,0215	1,0790
Si	0,74	0,3	4,3669	8,8513	4,4217
Sn	2,03	1,5	1,6923	11,6741	1,7868
Ta	1,69	1,3	9,5038	7,5979	9,6194
Th	1,12	0,6	2,6096	8,1274	2,6512
Ti	1,18	0,8	1,3882	23,8180	1,4761
U	1,83	1,4	4,4319	10,2740	4,5397
V	1,29	1,0	9,2284	7,1227	9,3461
W	1,55	1,2	17,3243	7,3234	17,4481
Zn	2,38	1,6	1,8403	12,1914	2,0362
Zr	0,77	0,6	3,8994	8,6963	3,9410
Ионные кристаллы и минералы					
Al_2O_3	1,60	1,4	41,4459	4,2629	41,7202
CsBr	1,93	1,5	0,8952	7,5090	0,9547
CsCl	1,97	1,4	0,5567	11,4866	0,6259
CsI	2,01	1,5	0,5456	9,0538	0,5968
Fe_3O_4	1,40	1,0	26,6830	3,9333	26,8730
FeS_2	1,50	0,9	4,1727	12,7322	4,3377
MgO	1,40	1,0	10,7374	6,7287	10,9796
NaBr	1,56	1,0	0,6910	10,8196	0,7644
NaCl	1,55	1,0	1,0849	8,9488	1,1733
NaI	1,59	1,0	0,4397	12,3490	0,4972
SiO_2	0,71	—	1,1129	12,6690	1,2123
Андрадит	1,1	0,5	4,6282	11,9457	4,8305
Гранат	1,4	1,2	29,4744	3,8243	29,7665
Гроссулярит	1,0	0,2	2,6384	17,6332	2,8428
Диопсид	0,9	0,2	2,2236	17,0914	2,3652
Лабрадор	0,4	0,2	10,0589	4,1678	10,1128
Оливин	1,2	1,0	25,5397	3,4413	25,7285
Ортоклаз	0,5	0,1	3,4593	6,7857	3,5255

Таблица 13.2. **Второй вириальный коэффициент газов B, см³/моль [6]**

T, K	Ar	CF_4	CH_4	CH_3Cl	CH_3F	$CHCl_3$	C_2H_2	C_2H_4	C_2N_2
293,15	—16,85	—91,18	—45,19	—439,61	—193,28	—1430,49	—162	—145,92	—381,96
400	— 0,82	—33,71	—15,69	—208,31	—103,88	—580,56	—87	—72,30	—171,68
500	7,17	— 4,50	— 0,81	—128,24	—58,66	—348,42	—51	—35,92	—66,09
600	12,25	13,57	8,67	—86,32	—34,70	—241,47	—28	—13,08	—0,75
700	15,67	26,03	15,00	—60,79	—20,16	—181,03	—12	2,47	44,75
800	18,09	34,94	19,63	—43,80	—10,48	—142,42	—1	13,85	77,11
900	19,84	41,47	22,96	—31,64	—3,64	—115,76	7	22,19	101,40
1000	21,19	46,55	25,59	—22,60	1,41	—96,34	14	28,64	120,22
1200	23,01	53,62	29,22	—10,04	8,04	—69,77	23	37,84	146,60
1400	24,03	58,25	31,60	—1,83	12,51	—52,51	29	44,04	164,09
1600	24,86	61,20	33,06	3,89	15,51	—40,45	34	48,36	176,27
1800	25,49	63,21	34,08	7,23	17,70	—31,57	37	51,53	184,50
2000	25,91	64,91	35,00	11,04	19,90	—24,80	39	53,78	190,26
2400	26,24	67,35	36,26	15,60	20,54	—15,12	43	56,55	199,06

Продолжение табл. 13.2

T, K	CO	CO_2	F_2	H_2	H_2O	He	Kr	N_2 [33]	NH_3
293,15	—10,04	—97,94	—20,97	12,16	—	11,15	—53,79	—5,47	—302,71
400	7,64	—49,07	—1,58	14,36	—333,23	10,94	—22,88	9,183	—120,11
500	16,57	—25,0	8,09	14,98	—163,47	10,72	—7,25	16,45	—68,30
600	22,14	—9,89	14,22	15,66	—98,83	10,51	2,56	21,01	—45,97
700	25,85	0,39	18,37	16,38	—66,30	10,32	9,23	24,03	—29,77
800	28,49	7,92	21,26	16,68	—47,22	10,13	14,01	26,12	—20,83
900	30,39	13,43	23,41	16,70	—34,85	9,97	17,60	27,63	—14,67
1000	31,80	17,70	25,03	16,72	—26,19	9,81	20,32	28,73	—10,19
1200	33,48	23,81	27,29	16,69	—15,07	9,58	24,20	30,08	—4,18
1400	34,76	27,92	28,53	16,55	—8,08	9,37	26,76	30,95	—0,38
1600	35,56	30,78	29,47	16,39	—3,83	9,15	28,53	31,59	2,18
1800	36,19	32,87	30,25	16,22	—0,68	8,93	29,65	31,87	3,93
2000	36,36	34,44	30,78	16,06	1,47	8,72	30,49	32,04	5,37
2400	36,70	36,28	31,21	15,69	4,69	8,44	31,84	32,13	7,30

Продолжение табл. 13.2

T, K	NO	N_2O	Ne	O_2	O_3	SF_6	SO_2	SiF_4	Xe
293,15	—18,25	—137,07	11,02	—17,00	—106,87	—292,12	—573	—144,01	—134,59
400	—3,98	—65,42	12,47	0,03	—54,20	—139,43	—339	—50,25	—70,79
500	3,36	—29,82	13,19	8,53	—27,73	—63,54	—123,46	—3,09	—39,83
600	7,90	—7,83	13,62	13,91	—11,19	—15,95	—84,62	26,56	—20,40
700	10,98	7,46	13,77	17,49	—0,15	16,41	—61,30	46,95	—6,92
800	13,19	18,43	13,87	20,06	7,96	39,66	—45,85	61,35	2,55
900	14,81	26,63	13,91	21,92	14,03	57,05	—32,92	71,97	9,67
1000	16,04	32,98	13,88	23,33	18,71	70,50	—26,81	80,18	15,29
1200	17,77	41,96	13,75	25,28	25,37	89,57	—15,57	91,72	23,25
1400	18,79	47,94	13,61	26,35	29,83	102,28	—8,21	99,23	28,53
1600	19,47	52,13	13,46	27,21	32,95	111,16	—3,05	103,99	32,32
1800	20,02	53,13	13,31	27,86	35,24	117,59	0,73	107,21	35,10
2000	20,47	57,19	13,16	28,30	36,96	121,89	3,62	109,90	37,19
2400	20,95	59,97	12,87	28,62	38,90	127,80	7,63	113,92	39,91

Таблица 13.3. **Третий вириальный коэффициент газов C, см^6/моль^2 [6]**

T, K	Ar	CO_2	F_2	H_2	H_2O	He	N_2	O_2	SF_6
293,15	960	3159	1368	297	—	98,78	1437	1127	35 868
400	848	2499	1205	283	—	89,48	1332	1000	28 388
500	807	2173	1146	271	—	82,90	1288	954	25 044
600	785	2005	1113	260	4650	77,63	1258	928	23 361
700	769	1911	1090	251	2840	73,29	1233	910	22 427
800	756	1852	1072	242	2170	69,65	1210	894	21 846
900	744	1814	1056	234	1570	66,57	1188	880	21 442
1000	733	1786	1040	227	1090	63,85	1167	867	21 131
1200	713	1744	1011	215	715	60,50	1128	841	20 646
1400	693	1709	983	204	537	57,40	1092	819	20 233
1600	675	1679	959	195	412	54,30	1059	797	19 853
1800	658	1650	934	188	366	51,20	1028	777	19 492
2000	642	1622	912	181	319	48,09	1000	758	19 148
2400	613	1571	872	169	246	44,73	951	724	18 514

правку на неидеальность газа, обусловленную соответственно двойными, тройнымн взаимодействиями и т. д. его частиц. Значения второго и третьего вириальных коэффициентов некоторых газов приведены в табл. 13.2 и 13.3.

Помимо уравнения (1) иногда используют разложение RV/RT в ряд по давлению $RV/RT=1+B'P+C'P^2+\ldots$, коэффициенты которого связаны с вирнальными коэффициентами соотношеннями $B=RTB'$, $C=(RT)^2(C'+B'^2)$ и т. д.

Для представления экспериментальных данных часто употребляются различные эмпирические уравнения состояния [4]. В простейшем случае такие уравнения содержат два параметра, которые можно вычислить по известным значениям критических температуры $T_{кр}$, давления $P_{кр}$ и объема $V_{кр}$, приведенным в табл. 13.4—13.6. Наиболее употребительными из двухпараметрических уравнений являются:

уравнение Ван-дер-Ваальса [4, 5]

$$\left(P+\frac{a}{V^2}\right)(V-b)=RT,$$

$$a=\frac{27}{24}RT_{кр}V_{кр},\qquad b=\frac{1}{3}V_{кр},$$

уравнение Дитеричи [4]

$$P(V-b)=RT\exp\{-a/RTV\},$$

$$a=2RT_{кр}V_{кр},\qquad b=\frac{1}{2}V_{кр};$$

уравнение Бертело [4]

$$(P+a/TV^2)(V-b)=RT,$$

$$a=\frac{16}{3}RT_{кр}V_{кр}^2,\qquad b=\frac{1}{4}V_{кр};$$

уравнение Редлиха—Квонга [29]

$$P=\frac{RT}{V-b}-\frac{a}{T^{1/2}V(V+b)},$$

$$a=0{,}4278R^2\frac{T_{кр}^{5/2}}{P_{кр}},\qquad b=0{,}26V_{кр}.$$

Иногда используют также эмпирические уравнения состояния, содержащие большее число параметров: модифицированное уравнение Редлиха—Квонга с тремя параметрами [30], уравнение Битти—Бриджмена с шестью параметрами [31], уравнение Бенедикта—Вебба—Рубина с восемью параметрами [32] и др.

Точность аппроксимации эмпирическими уравнениями состояния индивидуальна по отношению к исследуемому газу и зависит от размера области изменения переменных, достигая в отдельных случаях нескольких долей процента. Средн двухпараметрнческих уравнений состояния наиболее точным часто оказывается уравнение Редлиха—Квонга. В табл. 13.4—13.6 приведены значения постоянных Ван-дер-Ваальса для некоторых простых веществ, неорганических и органических соединений. Постоянные a_{AB}, b_{AB} химического соеднненния AB можно приближенно вычислить через постоянные a_A, b_A и a_B b_B компонентов A и B этого соединения:

$$\sqrt{a_{AB}}=\sqrt{a_A}+\sqrt{a_B},\qquad b_{AB}=b_A+b_B.$$

Аналогично можно вычислить постоянные a_{A+B}, b_{A+B} для смеси A+B компонентов A, B:

$$\sqrt{a_{A+B}}=x\sqrt{a_A}+(1-x)\sqrt{a_B};$$

$$b_{A+B}=xb_A+(1-x)b_B,$$

где x — концентрация компонента A в смеси. Более точные методы вычисления постоянных Ван-дер-Ваальса см. в [5].

13.3. КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ

Для всякого вещества существуют такие значения температуры $T_{кр}$, К, давления $P_{кр}$, Па, объема $V_{кр}$, см^3/моль, и плотности $\rho_{кр}$, г/см^3, которые называются критическими температурой, давлением, объемом и плотностью соответственно (в совокупностн — критическими

Таблица 13.4. **Критические параметры и постоянные Ван-дер-Ваальса простых веществ [9]. В круглых скобках указана погрешность приведенного значения**

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см^3	$V_{кр}$, см^3/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см^3/моль
Азот	N_2	126,25 (4)	3,399 (2)	0,304 (2)	92,1 (6)	0,1368	38,607
Аргон	Ar	150,65 (10)	4,86 (1)	0,531 (1)	75,2	0,1361	32,191
Бром	Br_2	584 (5)	10,3 (5)	1,18	135	0,9624	58,724
Водород:							
нормальный	*н*-H_2	33,24 (5)	1,297 (3)	0,0310	65,5	0,02484	26,635
равновесный	*р*-H_2	32,98	1,293	0,0314	64,2	0,02604	27,313
пара-	*пара*-H_2	32,98 (2)	1,293 (3)	0,03116	64,7	0,02453	26,509
Водорододейтерий	HD	35,91 (2)	1,484 (6)	0,0484	62,8	0,02535	25,158
Водородотритий	HT	38,3	1,66	0,0667	60,3	0,02574	23,953
Вольфрам [14]	W	>11 880 [10]	—	—	—	—	—
Гелий	He	5,20 (10)	0,229 (1)	0,0693	57,5	0,00344	23,599
Гелий-3	^{3}He	3,34 (2)	0,116 (3)	0,0414 [20]	72,5 [20]	0,00279	29,789
Дейтерий:							
нормальный	*н*-D_2	38,350 (2)	1,6650 (5)	0,0623	60,3	0,02576	23,940
равновесный	*р*-D_2	38,2	1,65	0,0669	60,3	0,02577	24,037
пара-	*пара*-D_2	38,26 (4)	1,6498 (61)	0,0623	60,3	0,02588	24,104
Дейтеротритий	DT	39,5	1,75	0,0867	58,5	0,02596	23,418
Золото [10]	Au	>4820 [14]	—	—	—	—	—
Иод	I_2	826 (20)	—	0,155 [12]	155 [20]	1,1976	51,667
Кадмий	Cd	>2480 [14]	—	—	—	—	—
Калий	K	2280 (50)	15,8 (1,0)	0,194 (25)	202 (26)	9,5908	149,90
Кислород	O_2	154,78 (5)	5,081 (10)	0,41 (2)	78	0,1375	31,662
Криптон	Kr	209,38 (10)	5,50 (1)	0,908	92,3	0,2324	39,549
Ксенон	Xe	289,74 (1)	5,841 (1)	1,099 (3)	119,47	0,4192	51,557
Литий [10]	Li	3223 (600)	69,4 (17,2)	0,12	58 (15)	4,3645	48,258
Медь [10]	Cu	>5390 [14]	—	—	—	—	—
Молибден [15]	Mo	11 150 (550)	553,3 (117,5)	2,62	36,5 (3,5)	6,5534	20,945
Назрий	Na	2503 (50)	25,6 (1,5)	0,207 (30)	111 (16)	7,1270	101,47
Неон	Ne	44,45 (10)	2,72 (1)	0,484 (1)	41,7	0,0211	16,948
Ниобий [10]	Nb	>9880 [14]	—	—	—	—	—
Озон	O_3	261,05 (10)	5,53 (1)	0,537	89,4	0,3592	49,038
Платина [10]	Pt	>6450 [14]	—	—	—	—	—
Радон	Rn	377,5	6,326 (2)	1,613 [11]	137 [11]	0,6570	62,019
Ртуть [10]	Hg	1763 (15)	153,5 (1,5)	5,3 (5)	36,5	0,5905	11,936
Рубидий	Rb	2106 (15)	16,2 [10]	0,347 (35)	246 (25)	7,9782	135,00
Свинец [10]	Pb	>3970 [14]	—	—	—	—	—
Селен*[1] [19]	Se	1590 (20)	38,5 (3,0)	1,235 [17]	147 [17]	1,9148	42,916
Сера*[2] [18]	S	1313 (5)	18,21	0,563	158	2,7611	74,941
Серебро [10]	Ag	>4300 [14]	—	—	—	—	—
Тритий нормальный	*н*-T_2	43,7	2,11	0,112	53,7	0,02642	21,549
Фосфор	P	968 (20)	8,1 (5)	0,144 [12]	215 [12]	3,3711	124,10
Фтор	F_2	144	5,6	0,574 [16]	66,2 [12]	0,1085	26,854
Хлор	Cl_2	417 (5)	7,71	0,573	124	0,6576	56,202
Цезий	Cs	2043 (15)	11,8 (3)	0,43 (4)	308 (30)	10,356	180,64
Цинк [10]	Zn	>2590 [14]	—	—	—	—	—
Цирконий [10]	Zr	>8950 [14]	—	—	—	—	—

*[1] В критической точке среднее число атомов в молекуле Se равно 2,3 [17].
*[2] В критической точке среднее число атомов в молекуле F равно 2,78 [18].

Таблица 13.5. **Критические параметры и постоянные Ван-дер-Ваальса неорганических соединений [9]. В круглых скобках указана погрешность приведенного значения**

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см^3	$V_{кр}$, см^3/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см^3/моль
Азот:							
дифторхлорид [20]	NF_2Cl	337,4	5,15	—	—	0,6450	68,122
закись	N_2O	309,58 (1)	7,255 (1)	0,453 (1)	97,27	0,3852	44,347

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см³/моль
оксид	NO	180 (1)	6,54 (2)	0,52	58	0,1444	28,579
оксодифторид	NOF_2	349,45 (50)	—	—	—	—	—
перекись	NO_2	431 (1)	10,1 (1)	0,56	82	0,5346	44,206
трифторид	NF_3	233,10 (10)	4,531 (12)	0,574 [12]	123,8 [12]	0,3497	53,462
фтордихлорид	$NFCl_2$	337,45 (1)	5,15 (5)	—	—	0,6452	68,1316
Алюминий:							
трибромид	$AlBr_3$	763 (2)	2,89 (6)	0,861 (5)	310 [20]	5,8791	274,59
триодид [12]	AlI_3	955 [20]	—	1,002	407	3,6356	135,67
трихлорид	$AlCl_3$	625,65 (50)	2,64 (5)	0,51 (3)	261 [20]	4,3165	245,86
Аммиак	NH_3	405,45 (5)	11,283 (5)	0,233	73,1	0,4249	37,347
Арсин [20]	AsH_3	373,0	—	—	—	—	—
Бор:							
трибромид	BBr_3	573 (5)	—	0,9 (1)	278 [22]	1,4900	92,667
триодид [12]	BI_3	773,15	—	1,10	356	2,5745	118,67
трифторид	BF_3	260,85 (10)	4,98 (2)	0,59 [12]	115 [12]	0,3980	54,379
трихлорид	BCl_3	451,95 (10)	3,87 (1)	0,7 (1)	150 (20)	1,5390	121,35
Ванадия оксихлорид	$VOCl_3$	636 [20]	—	0,60 [20]	290	1,7252	96,667
Висмут:							
трибромид	$BiBr_3$	1220 (5)	8,41	1,487 (15)	302	5,1612	150,76
трихлорид	$BiCl_3$	1178 (5)	11,97 (40)	1,210 (6)	261	3,3818	102,31
Воздух	—	413,8	3,77	0,35	—	1,3247	114,09
Вода (водорода окись)	H_2O	647,30 (5)	22,12 (1)	0,32 (1)	56,3	0,5524	30,413
Водород:							
бромистый	HBr	362,95 (20)	8,51 (5)	0,807 [22]	100 [22]	0,4514	44,317
иодистый	HI	423 (1)	8,22 (10)	1,09	117	0,6350	53,496
селенистый	H_2Se	411 (1)	8,9	0,349 [13]	97,7 [13]	0,5525	47,903
сернистый	H_2S	373,55 (10)	9,01 (1)	0,349	97,7	0,4518	43,097
фтористый	HF	461 (3)	6,49 (35)	0,29	69	0,9542	76,760
хлористый	HCl	324,55 (50)	8,26 (1)	0,42	86,8	0,3720	40,844
цианистый	HCN	465,65 (50)	5,39 (2)	0,195	139	1,1281	88,039
Водорода перекись [12]	H_2O_2	708,5	15,54	0,349	97,5	0,9418	47,372
Вольфрам:							
гексафторид	WF_6	444 (5)	4,4 (4)	1,28 (3)	233	1,3195	105,90
гексахлорид	WCl_6	923 (3)	4,9 (5)	0,94 (3)	420	5,0040	193,20
тетрахлороксид	$WOCl_4$	782 (4)	5,3 (3)	1,01 (4)	338	3,3847	154,24
трихлороксид	$WOCl_3$	637 (3)	—	0,60 (3)	289	1,7220	96,333
Гафний:							
тетрабромид	$HfBr_4$	746 (6)	4,1 (5)	1,20 (10)	415	3,9066	186,62
тетраиодид	HfI_4	913 (3)	3,9 (5)	1,30 (10)	530	6,1515	240,11
тетрахлорид	$HfCr_4$	724 (2)	5,7 (3)	1,05 (2)	304 [20]	2,6940	132,60
Германия тетрахлорид	$GeCl_4$	552 (2)	3,85 (5)	0,65 (1)	330	2,3078	148,99
Гидразин	N_2H_4	653	14,7	0,230 [12]	139 [12]	0,8464	46,190
Гидразина тетрафторид	N_2F_4	309	3,7 [20]	0,574 [12]	181 [12]	0,7427	85,656
Дейтерий:							
бромистый	DBr	362,0 [20]	—	—	—	—	—
иодистый	DI	421,8 [20]	—	—	—	—	—
селенистый	D_2Se	412,35	—	—	—	—	—
сернистый	D_2S	372,25	—	—	—	—	—
хлористый	DCl	323,4 [20]	—	—	—	—	—
оксид	D_2O	644,05 (10)	21,86 (3)	0,363	55,1	0,5535	30,625
перекись [12]	D_2O_2	717	13,9	—	—	1,0722	53,290
Дейтероаммиак	ND_3	405,45 (30)	—	—	—	—	—
Дейтероарсин	AsD_3	372,0 [20]	—	—	—	—	—
Диборан	B_2H_6	289,85 (2)	4,00 (2)	0,14 (3)	170 (10)	0,6121	75,263
цис-Дифтордиазин	*цис*-N_2F_2	272	5,8 [12]	0,559 [12]	118 [12]	0,3736	48,944
транс-Дифтордиазин	*транс*-N_2F_2	260	5,6	0,584 [12]	113 [12]	0,3537	48,486
Дициан	C_2N_2	400 (1)	6,0 (1)	—	—	0,7805	69,536
Железа пентакарбонил	$Fe(CO)_5$	563 (10)	—	—	—	—	—
Молибден:							
гексафторид	MoF_6	473 (5)	4,8 (4)	0,93 (3)	226	1,3700	103,22
пентахлорид	$MoCl_5$	850 (3)	5,3 (5)	0,74 (3)	369	3,9989	167,66
Мышьяка трихлорид	$AsCl_3$	654,45 (50)	—	0,720	252	1,5426	84,000
Никеля тетракарбонил	$Ni(CO)_4$	473 (10)	2,0 (5)	0,5 (1)	341	3,2196	242,57

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см³/моль
Ниобий:							
пентабромид	$NbBr_5$	1009 (5)	—	1,05 (4)	469	4,4264	156,33
пентахлорид	$NbCl_5$	803,5 (2,0)	4,88 (11)	0,68 (4)	397	3,8551	170,98
пентафторид [20]	NbF_5	737	6,3	1,21	155	2,5215	121,92
Нитрозил:							
фтористый [12]	NOF	349,4 [20]	7,98	0,595	82,3	0,4459	45,478
хлористый	NOCl	440 [20]	9,36 [21]	—	—	0,6030	48,841
Нитронил фтористый	NO_2F	349,5 [12]	9,3 [12]	0,602	108	0,3821	38,964
Оксонитротрифторид [12]	NOF_3	302,65	6,42	0,593 [20]	169 [20]	0,4158	48,962
Олова тетрахлорид	$SnCl_4$	591,85 (10)	3,744 (5)	0,742 (5)	351	2,7285	164,28
Перхлорилфторид	$FClO_3$	368,65 (40)	5,4	0,637	161	0,7380	71.3 41
Рений:							
оксид	Re_2O_7	942 (3)	6,9 (3)	1,45 (3)	334	3,7558	142,08
оксохлорид	ReO_4Cl	782 (3)	4,91 (25)	0,95 (2)	362	3,6289	165,37
Ртуть:							
дибромид	$HgBr_2$	1011 (10)	—	—	—	—	—
дииодид	HgI_2	1070 (10)	—	—	—	—	—
дихлорид	$HgCl_2$	972 (5)	11,52 (40)	1,555 (60)	174,6	2,3916	87,682
Селена тетрафторид	SeF_4	563 [12]	—	—	—	—	—
Селеноуглерод	CSe_2	612 (20)	7,0 (1,0)	0,85 (8)	200	1,5623	90,972
Сероуглерод	CS_2	552 (1)	7,90 (2)	0,44 (1)	173	1,1243	72,585
Сера:							
гексафторид	SF_6	318,70 (1)	3,759	0,732	199	0,7879	88,107
двуокись	SO_2	430,65 (20)	7,88 (1)	0,524 (5)	122	0,6821	56,774
пентафторидхлорид	SF_5Cl	117,7 (2)	—	—	—	—	—
тетрафторид	SF_4	364 [20]	—	—	—	—	—
трехокись	SO_3	491,15 (50)	8,21 (5)	0,633	126	0,8571	62,192
трифторонитрид	NSF_3	385	6,9	0,615	167,5	0,6274	58,070
фторонитрид	$NF_2 \cdot SF_5$	443,35 (30)	3,3	—	—	1,7143	137,79
Силан:	SiH_4	270 (1)	4,28 (15)	0,309	104 (10)	0,4972	65,623
бромид	SiH_3Br	454 (10)	5,64 (15)	0,627	177 (10)	1,0650	83,599
дибромид	SiH_2Br_2	550 (10)	5,30 (15)	0,772	246 (10)	1,6647	107,86
дииодид	SiH_2I_2	660 (10)	6,68 (15)	1,224	232 (10)	1,8996	102,57
дифтордихлорид	SiF_2Cl_2	368,92 (2)	3,500 (5)	—	—	1,1341	109,55
дихлорид	SiH_2Cl_2	470 (10)	4,53 (15)	0,515	196 (10)	1,4223	107,84
иодид	SiH_3I	515 (10)	6,94 (15)	0,988	160 (10)	1,1144	77,112
тетрабромид	$SiBr_4$	656 (10)	4,18 (15)	0,872	398 (10)	2,9989	162,91
тетраиодид	SiI_4	850 (10)	4,26 (15)	1,417	378 (10)	4,9393	207,08
тетрафторид	SiF_4	259,00 (2)	3,714 (5)	—	—	0,5266	72,462
тетрахлорид	$SiCl_4$	506 (10)	3,75 (15)	0,584	291 (10)	1,9916	140,26
трибромид	$SiHBr_3$	610 (10)	4,70 (15)	0,768	350 (10)	2,3081	134,84
триодид	$SiHI_3$	760 (10)	5,93 (15)	1,326	309 (10)	2,8417	133,25
трифторхлорид	SiF_3Cl	307,63 (2)	3,465 (5)	—	—	0,7964	92,258
трихлорид	$SiHCl_3$	495 (10)	4,17 (15)	0,533	254 (10)	1,7117	123,23
фтортрихлорид	$SiFCl_3$	438,41 (2)	3,600 (5)	—	—	1,5569	126,56
хлорид	SiH_3Cl	409 (10)	4,81 (15)	0,444	150 (10)	1,0136	88,315
Сурьма:							
трибромид	$SbBr_3$	904 [20]	—	—	—	—	—
триодид [21]	SbI_3	718,2	0,23	—	—	—	—
трихлорид	$SbCl_3$	794,05 (50)	—	0,842	271	2,0128	90,333
Тантал:							
пентабромид	$TaBr_5$	973 (5)	—	1,26 (3)	461	4,1956	153,67
пентахлорид	$TaCl_5$	767 (3)	4,3 (5)	0,89 (3)	401	3,9376	182,95
Титана тетрахлорид	$TiCl_4$	638 (3)	4,7 [20]	0,57 (2)	336	2,5468	142,25
Углерод:							
двуокись	CO_2	304,15 (5)	7,387 (5)	0,468 (1)	94	0,3652	42,792
окись	CO	132,92 (3)	3,499 (5)	0,301 (3)	93	0,1473	39,482
селеноокись	COSe	394,25 (50)	—	—	—	—	—
сероокись	COS	375,40 (10)	6,2 (1)	0,44 [20]	140 [20]	0,6649	63,120
Угольная кислота	H_2CO_3	304,19	7,380	0,459	135	0,3658	42,856
Урана гексафторид	UF_6	504 (1)	4,59 (6)	1,39 (2)	250 [20]	1,6139	114,11
Фосфин	PH_3	324,45 (20)	6,54 (4)	0,30 [21]	113,5 [21]	0,4697	51,593
Фосфоний хлористый	PH_4Cl	322,25 (20)	7,37 (4)	—	—	0,4111	45,463

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см³/моль
Фосфонитрилфторид:							
тример	$[PNF_2]_3$	460,85	—	—	—	—	—
тетрамер	$[PNF_2]_4$	496,35	—	—	—	—	—
пентамер	$[PNF_2]_5$	523,95	—	—	—	—	—
Фосфор:							
дифторхлорид	PF_2Cl	362,32 (5)	4,520	—	—	0,8470	83.303
пентахлорид	PCl_5	645,15 [22]	—	—	—	—	—
тридейтерид	PD_3	323,6 [20]	—	—	—	—	—
трифторид	PF_3	271,10 (2)	4,325	—	—	0,4955	65,134
трихлорид	PCl_3	563,15	—	0,520	264	1,3906	88,000
фтордихлорид	$PFCl_2$	462,99 (5)	4,99	—	—	1,2514	96,322
Фтора оксид	F_2O	215,5 (1)	4,96	0,553	97,6	0,2733	45,200
Фторимин	NHF_2	403	9,4	—	—	0,5026	44,445
Хлор:							
оксид [12]	Cl_2O	465	6,58	0,520	167	0,9589	73,487
пентафторид [12]	ClF_5	415,75	5,26	0,56 [20]	231	0,9585	82,161
трифторид [12]	ClF_3	447,5	5,8	—	—	1,0112	80,523
Цирконий:							
бромид	$ZrBr_4$	805 (6)	4,3 (5)	0,97 (10)	420	4,3374	192,01
иодид	ZrI_4	959 (6)	4,1 (5)	1,13 (10)	530	6,4560	239,90
хлорид	$ZrCl_4$	778 (2)	5,91 (15)	0,73 (2)	319	2,9881	136,87

Таблица 13.6. **Критические параметры и постоянные Ван-дер-Ваальса органических веществ. В круглых скобках указана погрешность приведенного значения, фр. — фреон**

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см³/моль
Углеводороды [23]							
Амилбензол [21]	$C_{11}H_{16}$	678,9	2,65	0,284	—	5,0629	265,77
Бензол	C_6H_6	562,6 [24]	4,92 [24]	0,304 [24]	259	1,8744	118,73
1,3-Бутадиен (дивинил)	C_4H_6	425	4,33	0,245	221	1,2175	102,08
н-Бутан	C_4H_{10}	425,16	3,797	0,228	255	1,3884	116,38
1-Бутен	C_4H_8	419,6	4,02	0,234	240	1,2764	108,40
цис-2-Бутен	C_4H_8	435,55	4,20	0,240	234	1,3156	107,64
транс-2-Бутен	C_4H_8	428,61	4,10	0,236	238	1,3055	108,54
н-Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	660,4	2,887	0,270	497	4,4058	237,75
втор-Бутилбензол [21]	$C_{10}H_{14}$	645	2,72	0,264	—	4,4510	245,93
трет-Бутилбензол [21]	$C_{10}H_{14}$	639,6	2,72	0,274	—	4,3768	243,87
1-Бутин (этилацетат)	C_4H_6	463,6	—	—	—	—	—
2-Бутин (диметилацетат)	C_4H_6	488,6	—	—	—	—	—
н-Гексадекан [24]	$C_{16}H_{34}$	725,15	1,42	0,24	924	10,810	531,25
1,5-Гексадиен	C_6H_{10}	507	—	—	—	—	—
Гексаметилбензол	$C_{12}H_{18}$	767	—	—	—	—	—
н-Гексан	C_6H_{14}	507,4	2,97	0,233	370	2,5289	177,62
1-Гексен	C_6H_{12}	503,98	—	—	—	—	—
н-Гептадекан [24]	$C_{17}H_{36}$	735,15	1,32	0,24	1001	11,965	580,01
н-Гептан	C_7H_{16}	540,2	2,735	0,232	432	3,1107	205,21
1-Гептен	C_7H_{14}	537,23	—	—	—	—	—
Дейтерометан [9]	CD_4	189,2 (1)	4,66 (1)	0,205 (2)	97,7	0,22397	42,1858
цис-Декагидронафталин [21]	$C_{10}H_{18}$	677	2,49	0,247	—	5,3621	282,26
транс-Декагидронафталин [21]	$C_{10}H_{18}$	664	2,61	0,254	—	4,9182	263,97
н-Декан [24]	$C_{10}H_{22}$	619,5	2,11	0,236	602	5,3104	305,48

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см³/моль
2, 2-Диметилбутан	C_6H_{14}	489,35	3,08	0,240	359	2,2671	165,10
2, 3-Диметилбутан	C_6H_{14}	499,93	3,127	0,241	358	2,3309	166,16
2, 2-Диметилгексан	C_8H_{18}	549,80	2,529	0,239	478	3,4856	225,92
2, 3-Диметилгексан	C_8H_{18}	563,42	2,628	0,244	468	3,5221	222,77
2, 4-Диметилгексан	C_8H_{18}	553,45	2,556	0,242	472	3,4942	224,99
2, 5-Диметилгексан	C_8H_{18}	549,99	2,628	0,237	482	3,4088	220,87
3, 3-Диметилгексан	C_8H_{18}	561,95	2,654	0,258	443	3,4703	220,07
3, 4-Диметилгексан	C_8H_{18}	568,78	2,692	0,245	460	3,5043	219,56
2, 2-Диметилпентан	C_7H_{16}	520,44	2,773	0,241	416	2,8486	195,03
2, 3-Диметилпентан	C_7H_{16}	537,29	2,908	0,255	393	2,89496	192,01
2, 4-Диметилпентан	C_7H_{16}	519,73	2,737	0,240	418	2,8783	197,36
3, 3-Диметилпентан	C_7H_{16}	536,34	2,946	0,242	414	2,8480	189,23
2, 2-Диметилпропан (неопентан)	C_5H_{12}	433,75	3,199	0,238	303	1,7152	140,92
1, 1-Диметилциклопентан [24]	C_7H_{14}	550,15	3,5	0,28	—	2,4889	161,22
цис-1, 2-Диметилциклопентан [24]	C_7H_{14}	565,15	3,4	0,27	—	2,7037	170,48
транс-1, 2-Диметилциклопентан [24]	C_7H_{14}	555,15	3,4	0,27	—	2,6089	167,47
цис-1, 3-Диметилциклопентан [24]	C_7H_{14}	555,15	3,4	0,27	—	2,6089	167,47
транс-1, 3-Диметилциклопентан [24]	C_7H_{14}	555,15	3,5	0,28	—	2,5343	162,68
Дифенил	$C_{12}H_{10}$	789	3,8	0,307	502	4,7150	212,96
1, 2-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	662,8	2,96	0,279	—	4,3299	232,81
1, 3-Диэтилбензол [21]	$C_{10}H_{14}$	657,1	2,92	0,287	—	4,5035	243,95
1, 4-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	657,88	2,803	0,281 [21]	—	4,5033	243,95
н-Додекан [24]	$C_{12}H_{26}$	659,15	1,81	0,237	718	6,9856	377,69
Изобутилбензол	$C_{10}H_{14}$	640	3,1	0,274 [21]	—	3,8028	211,75
Изопропилбензол (кумол)	C_9H_{12}	631,15	3,1	0,28	—	3,6984	208,82
орто-Ксилол [24]	C_8H_{10}	632,15	3,6	0,28	379	3,1948	180,10
мета-Ксилол [24]	C_8H_{10}	616,97	3,541	0,282	370	3,1346	181,10
пара-Ксилол [24]	C_8H_{10}	616,2	3,511	0,280	379	3,1539	182,40
Метан [9]	CH_4	190,60 (5)	4,63 (1)	0,160 (2)	100	0,2288	42,777
2-Метилбутан (изопентан)	C_5H_{12}	460,39	3,381	0,236	306	1,8281	141,50
2-Метил-1-бутен	C_5H_{10}	465	3,4	—	—	1,8304	140,27
2-Метил-2-бутен	C_5H_{10}	470	3,4	—	—	1,8699	141,78
2-Метилгексан	C_7H_{16}	530,31	3,038	0,238	421	2,6998	181,43
3-Метилгексан	C_7H_{16}	535,19	2,814	0,248	404	2,9685	197,67
2-Метилгептан	C_8H_{18}	595,57	2,485	0,234	488	4,1634	249,12
3-Метилгептан	C_8H_{18}	563,60	2,546	0,246	464	3,6379	230,03
4-Метилгептан	C_8H_{18}	561,67	2,542	0.240	467	3,6188	229,60
1-Метилнафталин	$C_{11}H_{10}$	772	—	—	—	—	—
2-Метилнафталин	$C_{11}H_{10}$	761	—	—	—	—	—
2-Метилпентан	C_6H_{14}	497,45	3,010	0,235	367	2,3972	171,73
3-Метилпентан	C_6H_{14}	504,4	3,124	0,235	367	2,3751	168,80
2-Метилпропан (изобутан)	C_4H_{10}	408,13	3,648	0,221	263	1,3317	116,28
2-Метилпропен (изобутилен)	C_4H_8	417,89	4,000	0,235	239	1,2731	108,56
2-Метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	567,02	2,700	0,258	443	3,4722	218,22
3-Метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	576,51	2,808	0,251	455	3,4521	213,39
Метилциклогексан	C_7H_{14}	572,12	3,471	0,267	368	2,7498	171,28
Метилциклопентан	C_6H_{12}	532,73	3,785	0,264	319	2,1869	146,29
Нафталин	$C_{10}H_8$	748,4	4,051	0,31	410	4,0321	192,00
н-Нонадекан [21]	$C_{19}H_{40}$	760	1,2	0,24	1118	13,853	649,58
н-Нонан [21]	C_9H_{20}	595,4	2,316	0,236	534	4,4632	267,14
н-Октадекан [21]	$C_{18}H_{38}$	753,2	1,3	0,24	1059	12,560	594,25
н-Октан	C_8H_{18}	568,76	2,487	0,232	492	3,7940	237,72
1-Октен	C_8H_{16}	566,6	—	—	—	—	—
н-Пентадекан [21]	$C_{15}H_{32}$	710,6	1,596	0,24	888	9,2274	462,75
н-Пентан	C_5H_{12}	469,9	3,369	0,237	304	1,9113	144,95
1-Пентен	C_5H_{10}	464,74	4,05	—	—	1,5541	119,17

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см³/моль
цис-2-Пентен	C_5H_{10}	476	3,6	—	—	1,8114	135,61
транс-2-Пентен	C_5H_{10}	475	3,6	—	—	1,8038	135,33
1-Пентин (пропилацетилен)	C_5H_8	493,4	—	—	—	—	—
Пропадиен (аллен) [24]	C_3H_4	393,85	5,25	—	—	0,8619	77,984
Пропан	C_3H_8	369,82	1,514	0,217	203	2,6347	253,89
Пропен (пропилен)	C_3H_6	365,0	4,62	0,233	181	0,8409	82,098
н-Пропилбензол	C_9H_{12}	638,30	3,200	0,273	440	3,7132	207,31
Пропин (метилацетилен)	C_3H_4	402,38	5,526	0,245	164	0,8544	75,670
н-Тетрадекан	$C_{14}H_{30}$	695	1,678	0,24	826	8,3949	430,45
1, 2, 3, 4-Тетрагидронафталин [21]	$C_{10}H_{12}$	719	3,52	0,309	—	4,2876	212,52
1, 2, 3, 4-Тетраметилбензол [21]	$C_{10}H_{14}$	700,1	3,27	0,308	—	4,3673	222,31
1, 2, 3, 5-Тетраметилбензол [21]	$C_{10}H_{14}$	686,8	3,21	0,308	—	4,2824	222,21
1, 2, 4, 5-Тетраметилбензол (дурол)	$C_{10}H_{14}$	675	2,9	0,306 [21]	—	4,5219	238,73
2, 2, 3, 3-Тетраметилбутан	C_8H_{18}	567,8	2,87	0,248	461	3,2788	205,78
2, 2, 3, 3-Тетраметилгексан [25]	$C_{10}H_{22}$	623	2,510	—	—	4,5098	257,97
2, 2, 5, 5-Тетраметилгексан [25]	$C_{10}H_{22}$	581,5	2,186	—	—	4,5119	276,50
2, 2, 3, 3-Тетраметилгептан [25]	$C_{11}H_{24}$	607,6	2,741	—	—	3,9280	230,38
2, 2, 3, 4-Тетраметилгептан [25]	$C_{11}H_{24}$	592,6	2,602	—	—	3,9358	236,68
2, 2, 4, 4-Тетраметилгептан [25]	$C_{11}H_{24}$	574,6	2,485	—	—	3,8754	240,35
2, 3, 3, 4-Тетраметилгептан [25]	$C_{11}H_{24}$	607,5	2,716	—	—	3,9634	232,49
Толуол (метилбензол)	C_7H_8	591,72	4,109	0,292	316	2,4851	149,67
н-Тридекан [21]	$C_{13}H_{28}$	677,2	1,778	0,24	767	7,5208	395,77
1, 2, 3-Триметилбензол	C_9H_{12}	664,45	3,454	0,28 [21]	430 [13]	3,7274	199,91
1, 2, 4-Триметилбензол	C_9H_{12}	649,05	3,232	0,28 [21]	430 [13]	3,8008	208,68
1, 3, 5-Триметилбензол	C_9H_{12}	637,28	3,121	0,28 [21]	430 [13]	3,7951	212,22
2, 2, 3-Триметилбутан	C_7H_{16}	531,11	2,954	0,252	398	2,7851	186,87
2, 2, 5-Триметилгексан	C_9H_{20}	568,0	—	—	—	—	—
3, 3, 5-Триметилгептан [25]	$C_{10}H_{22}$	609,5	2,310	—	—	4,6894	274,18
2, 2, 3-Триметилпентан	C_8H_{18}	563,43	2,730	0,262	436	3,3915	214,51
2, 2, 4-Триметилпентан (изооктан)	C_8H_{18}	543,89	2,568	0,244	408	3,3599	220,14
2, 3, 3-Триметилпентан	C_8H_{18}	573,49	2,820	0,251	455	3,4013	211,36
2, 3, 4-Триметилпентан	C_8H_{18}	566,34	2,730	0,248	461	3,4266	215,62
орто-Трифенил	$C_{18}H_{19}$	891,0	3,901	0,306	769	5,9348	237,37
мета-Трифеиил	$C_{18}H_{19}$	924,8	3,506	0,300	784	7,1142	274,14
пара-Трифенил	$C_{18}H_{19}$	926,0	3,324	0,302	779	7,5241	289,56
н-Уидекан [21]	$C_{11}H_{24}$	642,6	1,958	0,237	659	6,1515	341,14
Циклогексан	C_6H_{12}	553,4	4,07	0,273	308	2,1926	141,19
Циклогексен	C_6H_{10}	560,41	4,24 [21]	0,288 [21]	—	2,1624	137,50
Циклогептан [26]	C_7H_{14}	604,3	3,81	—	353	2,7952	164,84
Циклооктан [26]	C_8H_{16}	647,2	3,55	—	410	3,4442	189,66
Циклопентан	C_5H_{10}	511,6	4,508	0,27	260	1,6932	117,92
Циклопентен [21]	C_5H_8	504	4,55	0,277	251	1,6282	115,13
Циклопропан	C_3H_6	397,80	5,495	—	—	0,8398	75,236
Цимол	$C_{10}H_{14}$	658 [13]	—	—	—	—	—
Эйкозан	$C_{20}H_{42}$	775	1,1	0,24	1176	15,715	722,62
Этан [9]	C_2H_6	305,45 (10)	4,87 (1)	0,203 (5)	148	0,5571	64,997
Этен (этилен) [9]	C_2H_4	282,36	5,066 (2)	0,227 (5)	124	0,4589	57,921
Этилбензол	C_8H_{10}	617,09	3,609	0,284	374	3,0769	177,69
3-Этилгексан	C_8H_{18}	565,42	2,608	0,251	455	3,5747	225,30
3-Этилпентан	C_7H_{16}	540,57	2,891	0,241	416	2,9479	194,34
орто-Этилтолуол [21]	C_9H_{12}	653	3,1	0,28	430 [13]	3,9587	216,05
мета-Этилтолуол [21]	C_9H_{12}	636	3,1	0,28	430 [13]	3,7553	210.43

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см³/моль
пара-Этилтолуол [21]	C_9H_{12}	636	3,1	0,28	430 [13]	3,7553	210,43
Этилциклопентан	C_7H_{14}	569,45	3,398	0,262	375	2,7835	174,19
Этин (ацетилен) [9]	C_2H_2	308,33 (1)	6,24 (1)	0,232 (1)	112	0,4442	51,338
Кислородсодержащие соединения [23]							
Анизол (метилфениловый эфир)	C_7H_8O	641	4,18	—	—	2,8703	159,57
Ацетальдегид [9]	C_2H_4O	461(5)	—	—	—	—	—
Ацетон	C_3H_6O	508,2	4,70	0,278	209	1,6020	112,34
Бензальдегид	C_7H_6O	625	2,18	0,330 [27]	—	5,2291	298,16
1-Бутанол	$C_4H_{10}O$	562,93	4,413	0,270	274	2,0942	132,58
2-Бутанол	$C_4H_{10}O$	535,95	4,194	0,276	268	1,9974	132,81
трет-Бутанол	$C_4H_{10}O$	506,2	3,972	0,270	275	1,8813	132,45
н-Бутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	579	—	—	—	—	—
Валериановая кислота	$C_4H_{10}O_2$	651	—	—	—	—	—
Винилэтиловый спирт	C_4H_8O	475	4,07	—	—	1,6154	121,19
1-Гексанол	$C_6H_{14}O$	610	—	0,268	381	2,1739	127,00
1-Гептанол	$C_7H_{16}O$	633	—	0,267	435	2,3980	135,00
Дейтероуксусная кислота [9]	$C_2H_3DO_2$	594,1 (1)	—	—	—	—	—
Дейтероэтанол [9]	C_2H_5DO	514,9 (1)	—	—	—	—	—
1-Деканол	$C_{10}H_{22}O$	700	—	0,264	600	3,9285	200,00
Диизопропиловый эфир	$C_5H_{12}O$	500	2,88	0,265	386	2,5336	180,57
Диметилоксалат	$C_4H_6O_4$	628	3,98	—	—	—	—
Диметоксиметан	$C_3H_8O_2$	497	—	—	—	—	—
1, 2-Диметоксиэтан	$C_4H_{10}O_2$	536	3,87	0,333	271	2,1646	143,91
1, 4-Диоксан	$C_4H_8O_2$	587	5,48	0,370	238	1,8331	111,29
Дифениловый эфир [24]	$C_{12}H_{10}O$	805,15	3,57	—	—	—	—
1, 1-Диэтоксиэтан (ацеталь)	$C_6H_{14}O_2$	527	—	—	—	—	—
Изоамилацетат	$C_7H_{14}O_2$	509	—	—	—	—	—
Изобутанол	$C_4H_{10}O$	547,73	4,295	0,272	273	2,0369	132,53
Изобутилацетат [21]	$C_6H_{12}O_2$	561	3,1	0,281	—	2,9218	185,61
Изобутилбутират	$C_8H_{16}O_2$	611	—	—	—	—	—
Изобутилизобутират	$C_8H_{16}O_2$	602	—	—	—	—	—
Изобутилвалерат	$C_9H_{18}O_2$	621	—	—	—	—	—
Изобутилпропионат	$C_7H_{14}O_2$	592	—	—	—	—	—
Изобутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	551	3,88	0,29	350	2,2815	147,56
Изовалериановая кислота	$C_4H_{10}O_2$	634	—	—	—	—	—
Изомасляная кислота	$C_4H_8O_2$	609	4,05	0,302	292	2,6686	156,16
Изопентилбутират	$C_9H_{18}O_2$	619	—	—	—	—	—
Изопентилпропионат	$C_8H_{16}O_2$	611	—	—	—	—	—
Изопентилформиат	$C_6H_{12}O_2$	578	—	—	—	—	—
2, 3-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	722,8	—	—	—	—	—
2, 4-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	707,6	—	—	—	—	—
2, 5-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	723,0	—	—	—	—	—
2, 6-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	701,0	—	—	—	—	—
3, 4-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	729,8	—	—	—	—	—
3, 5-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	715,6	—	—	—	—	—
орто-Крезол	C_7H_8O	697,6	5,01	0,375 [21]	—	2,8353	144,84
мета-Крезол	C_7H_8O	705,8	4,56	0,357 [21]	310	3,1861	160,87
пара-Крезол	C_7H_8O	704,6	5,15	0,347 [21]	—	2,8127	142,26
Масляная кислота	$C_4H_8O_2$	628	5,27	0,304	290	2,1828	123,87
Метанол [9]	CH_4O	513,15 (30)	7,95 (5)	0,272 (5)	118	0,9654	67,047
Метилацетат	$C_3H_6O_2$	506,8	4,69	0,325	228	1,5966	112,27
2-Метил-2-бутанол	$C_5H_{12}O_2$	545	—	—	—	—	—
3-Метил-1-бутанол	$C_5H_{12}O_2$	579,40	—	—	—	—	—
3-Метил-2-бутанон	$C_5H_{10}O$	553,4	3,85	0,278	310	2,3195	149,37
Метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	554,4	3,48	0,300	340	2,5791	165,78
Метилвалерат [21]	$C_5H_{12}O_2$	567	3,2	0,279	—	2,8914	181,73
Метилизобутират	$C_5H_{10}O_2$	540,8	3,44	0,301	339	2,4830	163,62
Метиллаурат	$C_{13}H_{26}O_2$	712	—	—	—	—	—
Метиловый (диметиловый) эфир	C_2H_6O	400,05 (10)	5,37 (5)	0,238 (15)	193	0,8691	77,418

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см³/моль
4-Метил-2-пентанон	$C_6H_{12}O$	571	3,27	—	—	2,9052	181,32
Метилпропионат	$C_4H_8O_3$	530,6	4,004	0,312	282	2,0503	137,71
2-Метилтетрагидрофуран	$C_5H_{10}O$	537	3,76	0,322	267	2,2371	148,46
Метилформиат [9]	$C_2H_4O_2$	487,15 (10)	5,998 (5)	0,349 (5)	172	1,1538	84,400
2-Метилфуран	C_5H_6O	527	4,72	0,333	247	1,7153	115,99
Метилэтилкетон (бутанон)	C_4H_8O	535,6	4,15	0,270	267	2,0138	133,99
Метилэтиловый эфир	C_3H_8O	437,8	4,40	0,272	221	1,27107	103,46
1-Нонанол	$C_9H_{20}O$	677	—	0,264	546	3,4575	182,00
1-Октанол	$C_8H_{18}O$	658	—	0,266	490	3,0158	163,33
2-Октанол	$C_8H_{18}O$	637	—	—	—	—	—
Паральдегид	$C_6H_{12}O_3$	563	—	—	—	—	—
1-Пентанол	$C_5H_{12}O$	586	—	0,270	326	1,7869	108,67
2-Пентанон	$C_5H_{10}O$	564	3,89	0,286	301	2,3842	150,64
3-Пентанон	$C_5H_{10}O$	561,0	3,74	0,256	336	2,4548	155,93
н-Пентилформиат	$C_6H_{12}O_2$	576	—	—	—	—	—
1-Пропанол	C_3H_8O	536,71	5,170	0,275	218	1,6250	107,90
2-Пропанол	C_3H_8O	508,31	4,764	0,273	220	1,5816	110,88
н-Пропилацетат	$C_5H_{10}O_2$	549,4	3,33	0,296	345	2,6405	171,28
н-Пропилбутират	$C_7H_{14}O_2$	600	—	—	—	—	—
н-Пропилизобутират	$C_7H_{14}O_2$	589	—	—	—	—	—
н-Пропилизовалерат	$C_8H_{16}O_2$	609	—	—	—	—	—
Пропилена окись	C_3H_6O	482,2	4,92	0,312	186	1,3769	101,76
н-Пропилпропионат	$C_6H_{12}O_2$	578	—	—	—	—	—
Пропионовая кислота	$C_3H_6O_2$	612	5,37	0,32	230	2,0339	118,43
Пропилформиат	$C_4H_8O_2$	538,0	4,06	0,309	285	2,0774	137,61
Тетрагидрофуран	C_4H_8O	540,2	5,19	0,322	224	1,6404	108,22
Уксусная кислота [9]	$C_2H_4O_2$	594,75 (10)	5,786 (5)	0,351 (50)	171	1,7829	106,83
Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	569	4,68	—	—	2,0169	126,32
Фенетол (этоксибензол)	$C_8H_{10}O$	647	3,42	—	—	3,5645	196,33
Фенол	C_6H_6O	694,2	6,13	0,401 [21]	—	2,2926	117,69
Фуран	C_4H_4O	490,2	5,50	0,312	218	1,2737	92,592
Циклогексанол	$C_6H_{12}O_2$	625	3,75	—	—	3,0386	173,25
Циклогексанон	$C_6H_{10}O$	629	3,85	—	—	2,9966	169,77
Этанол [9]	C_2H_6O	516 (2)	6,4 (1)	0,276 (5)	167	1,2164	84,006
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	523,2	3,83	0,308	286	2,0843	141,96
Этилбутират [21]	$C_6H_{12}O_2$	566	3,0	0,276	410	3,0733	193,51
Этилвалерат	$C_7H_{14}O_2$	570	—	—	—	—	—
Этилена окись [9]	C_2H_4O	468 (1)	7,19 (1)	0,32 (1)	138	0,8878	67,607
Этилизобутират	$C_6H_{12}O_2$	553	3,0	0,28	410	2,9938	189,06
Этилизовалерат	$C_7H_{14}O_2$	588	—	—	—	—	—
Этиловый (диэтиловый) эфир	$C_4H_{10}O$	466,70	3,638	0,265	280	1,7462	133,33
Этилпропиловый эфир	$C_5H_{12}O$	500,6 [21]	3,25	0,36	240	2,2469	159,95
Этилпропионат	$C_5H_{10}O_2$	546	3,362	0,296	345	2,5859	168,78
орто-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	703,0	—	—	—	—	—
мета-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	716,4	—	—	—	—	—
пара-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	716,4	—	—	—	—	—
Этилформиат	$C_3H_6O_2$	508,4	4,74	0,323	229	1,5895	111,42
Этиловый эфир нонановой кислоты	$C_{11}H_{22}O_2$	674	—	—	—	—	—
Этиловый эфир октановой кислоты	$C_{10}H_{20}O_2$	659	—	—	—	—	—
Галогеносодержащие соединения [23]							
Бензотрифторид [21]	$C_7H_5F_3$	562,6	3,56	0,427	342	2,5954	164,40
Бромбензол	C_6H_5Br	670	4,52	0,485	324	2,8968	154,08
Бромметан [12]	CH_3Br	464	6,94	—	206	0,9045	69,475
Бромтрииодметан [9]	$CBrI_3$	750	—	—	—	—	—
Бромэтан [9]	C_2H_5Br	503,85 (1,5)	6,23 (5)	0,507	215	1,1881	84,029
Гексафторацетон	C_3F_6O	357,2	2,84	—	—	1,3115	130,84
Гексафтордихлорпропан [28]	$C_3F_6Cl_2$	449	2,99	0,62	356	2,0077	159,35
Гексафторэтан	C_2F_6	292,85 (50)	3,3	0,617	224	0,7479	91,0196

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см³/моль
орто-Дибромбензол [21]	$C_6H_4Br_2$	761,75	4,22	0,645	—	4,0144	187,81
Дибромметан [28]	CH_2Br_2	583	7,2	0,525	165	1,3778	84,219
1,1-Дибромэтилен [9]	$C_2H_4Br_2$	582,95 (1,5)	7,15 (8)	—	—	1,3854	84,689
Дииодметан [34]	CH_2I_2	605,7	6,47	0,840	—	—	—
Дифторбромметан [9, 34]	CHF_2Br	409	5,18	0,750	—	—	—
Дифтордибромметан [9]	CF_2Br_2	464	4,22	0,866 [34]	—	1,4867	114,18
Дифтордиодметан [9]	CF_2I_2	477	—	—	—	—	—
Дифтордихлорметан (фреон-12) [9]	CF_2Cl_2	384,65 (20)	4,01 (1)	0,555 (5)	218	1,0753	99,626
Дифториодметан [9]	CHF_2I	459	—	—	—	—	—
Дифторметан [9]	CH_2F_2	351,55 (20)	5,83 (5)	0,430 (50)	120	0,6182	62,664
1, 2-Дифтор-1, 1, 2, 2-тетрахлорэтан [34]	$C_2F_2Cl_4$	551	3,33	0,569	—	—	—
Дифторхлорбромметан [28]	CF_2ClBr	428	4,310	0,741 [34]	245,7 [12]	1,2396	103,22
Дифторхлорметан (фреон-22) [9]	CHF_2Cl	369,55 (50)	4,91 (5)	0,525 (10)	165	0,8104	78,151
1, 1-Дифтор-2-хлорэтилен [9]	C_2HF_2Cl	400,6 (5)	4,46 (7)	0,499 (10)	197	1,0497	93,382
1, 1-Дифтор-1-хлорэтан [9]	$C_2H_3F_2Cl$	410,25 (50)	4,12 (7)	0,435 (10)	231	1,1902	103,38
1, 1-Дифторэтан [9]	$C_2H_4F_2$	386,65 (70)	4,49 (7)	0,365 (10)	181	0,9713	89,519
1, 1-Дифторэтилен [9]	$C_2H_2F_2$	302,85 (2)	4,46 (1)	0,414 (2)	155	0,5993	70,515
орто-Дихлорбензол [21]	$C_6H_4Cl_2$	697 [28]	4,10	0,408	360	3,4522	176,51
мета-Дихлорбензол [21]	$C_6H_4Cl_2$	684	3,88	0,415	—	3,5156	183,17
пара-Дихлорбензол [21]	$C_6H_4Cl_2$	684,75	3,90	0,395	—	3,5050	182,42
Дихлорбромметан [34]	$CHCl_2Br$	585,43	5,60	0,712	—	—	—
Дихлордибромметан [34]	CCl_2Br_2	668,21	4,84	0,793	—	—	—
Дихлорметан [9]	CH_2Cl_2	510 (2)	6,1 (1)	0,472 (25)	180	1,2477	87,181
1, 1-Дихлорэтан [9]	$C_2H_4Cl_2$	523 (5)	5,1 (3)	0,308	321	1,5745	107,28
1, 2-Дихлорэтан [9]	$C_2H_4Cl_2$	561 (2)	5,4 (3)	0,44 (3)	225	1,7091	108,56
1, 1-Дихлорэтилен [12]	$C_2H_2Cl_2$	494,15	5,23	—	220,3	1,3619	98,223
цис-1, 2-Дихлорэтилен [12]	$C_2H_2Cl_2$	544,15	5,86	—	220,3	1,4743	96,559
транс-1, 2-Дихлорэтилен [9]	$C_2H_2Cl_2$	516,5	5,52	—	220,3 [12]	1,4088	97,202
Иодбензол	C_6H_5I	721	4,52	0,581	351	3,3546	165,81
Иодметан [9]	CH_3I	528	—	0,83	171	0,8445	57,000
Пентафторбензол	C_6HF_5	532,0	3,52	—	—	2,3475	157,25
1Н-Пентадекафторгептан	C_7HF_{15}	495,8	—	—	—	—	—
Пентафторбромбензол	C_6F_5Br	670	4,52	—	—	2,8968	154,08
1, 1, 2-Пентафторпропан	$C_3H_3F_5$	380,11	3,137	0,491	273	1,3431	125,92
Пентафторхлорацетон	C_3F_5ClO	410,6	2,88	—	—	1,7086	144,29
Пентафторхлорбензол	C_6F_5Cl	571,0	3,22	—	—	2,9509	184,17
Пентафторхлорэтан (фреон-115) [9]	C_2F_5Cl	353,1 (1)	3,157 (51)	0,613 (4)	252	1,1516	116,22
Перфторбензол	C_6F_6	516,72	3,304	0,493 [29]	—	2,3565	162,52
Перфтор-*н*-бутан	C_4F_{10}	386,4	2,323	0,629	378	1,8740	172,84
Перфтор-2-бутилтетрагидрофуран	$C_8F_{16}O$	500,2	1,607	0,707	588	4,5404	323,48
Перфтор-*н*-гексан	C_6F_{14}	447,6	1,905	—	—	3,0671	244,19
Перфтор-1-гексен	C_6F_{12}	454,4	—	—	—	—	—
Перфтор-*н*-гептан	C_7F_{16}	474,8	1,62	0,584	664	4,0552	304,36
Перфтор-1-гептен	C_7F_{14}	478,2	—	—	—	—	—
Перфтор-*н*-декан	$C_{10}F_{22}$	542	1,45	—	—	5,9125	388,75
Перфторметилциклогексан	C_6F_{12}	488,6	2,3	—	—	2,9872	217,88
Перфторнафталин	$C_{10}F_8$	673,0	—	—	—	—	—
Перфтор-*н*-нонан	C_9F_{20}	524	1,56	—	—	5,1316	348,99
Перфтор-*н*-октан	C_8F_{18}	502	1,66	—	—	4,4225	313,95
Перфтор-*н*-пентан	C_5F_{12}	422	2,04	—	475 [30]	2,5500	215,34
Перфтор-*н*-пропан	C_3F_8	345,0	2,680	0,628	299	1,2952	133,78
Перфторпропилен	C_3F_6	358	3,36	0,6 [31]	—	1,1110	110,60
Перфторциклобутан	C_4C_8	388,37	2,777	0,616	325	1,5838	145,32
Перфторциклогексан	C_6F_{12}	457,2	2,4	—	—	2,5067	195,39
Перфторциклогексен	C_6F_{10}	461,8	—	—	—	—	—
Тетрафтордихлорэтан [24]	$C_2F_4Cl_2$	418,95	3,38	0,583	—	1,5125	128,65
1, 1, 2, 2-Тетрафтор-1, 2-дихлорэтан	$C_2F_4Cl_2$	418,8	3,26	0,582	294	1,5677	133,40

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см³/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см³/моль
1, 2, 2, 2-Тетрафтор-1, 1-дихлорэтан [9]	$C_2F_4Cl_2$	418,65 (5)	3,30 (7)	0,582 (10)	294	1,5474	131,72
Тетрафторэтилен [9]	C_2F_4	306 (1)	3,95 (10)	0,58 (1)	172	0,6910	80,475
Тетрахлорацетилен [9]	$C_2H_2Cl_4$	642 (10)	3,95 (30)	0,503 (15)	334	3,0417	168,84
Тетрахлорэтилен [12]	C_2Cl_4	613,2	4,48	—	289	2,4483	144,29
Трибромметан [34]	$CHBr_3$	684,94	5,91	0,989	—	—	—
1Н-Тридекафторгексан	C_6HF_{13}	471,8	—	—	—	—	—
Триодметан [9]	CHI_3	690	—	—	—	—	—
Трифторбромметан	CF_3Br	340	3,97	0,76	200	0,8488	88,960
Трифториодметан [9]	CF_3I	359	—	—	—	—	—
Трифторметан (фреон-23) [9]	CHF_3	299,05 (50)	4,86 (10)	0,525 (10)	133	0,5362	63,901
Трифторпропилен [31]	$C_3H_3F_3$	376	3,92	0,455	—	1,0514	99,651
1, 1, 2-Трифтор-1, 2, 2-трихлорэтан [9]	$C_2F_3Cl_3$	487,25 (50)	3,415 (20)	0,576 (10)	325	2,0276	148,29
Трифторуксусная кислота	$C_2HF_3O_2$	491,3	3,258	0,559	204	2,1608	156,74
Трифторхлорметан [9]	CF_3Cl	301,95 (20)	3,95 (5)	0,58 (1)	180	0,6728	76,410
Трифторхлорэтилен [9]	C_2F_3Cl	379 (1)	4,05 (10)	0,55 (1)	212	1,0335	97,181
1, 1, 1-Трифторэтан (фреон-143) [9]	$C_2H_3F_3$	346,25 (50)	3,76 (7)	0,434 (10)	193	0,9301	95,723
1, 2, 4-Трихлорбензол [28]	$C_6H_3Cl_3$	735,0	3,98	0,472	384	3,9563	191,82
Трихлорбромметан [34]	CCl_3Br	602,46	4,693	0,697	—	—	—
Трихлориодметан [9]	CCl_3I	607	—	—	—	—	—
1, 1, 1-Трихлорэтан [9]	$C_2H_3Cl_3$	550 (10)	4,46 (30)	0,464 (15)	288	1,9787	128,21
Трихлорэтилен [12]	C_2HCl_3	571,15	4,89	—	256,1	1,9438	121,28
Углерод:							
четырехбромистый	CBr_4	715 [9]	—	—	—	—	—
четырехиодистый	CI_4	740 [9]	—	—	—	—	—
четырехфтористый (фреон-14)	CF_4	227,7	3,745	0,647	136	0,4044	63,291
четыреххлористый [9]	CCl_4	556,25 (50)	4,56 (2)	0,558 (10)	276	1,9789	126,78
1Н-Ундекафторпентан	C_5HF_{11}	444,0	—	—	—	—	—
1Н-Ундекафторциклогексан	C_6HF_{11}	477,6	—	—	—	—	—
Фосген [9]	CCl_2O	455 (1)	5,67 (10)	0,52 (1)	190	1,0640	83,335
Фторбензол	C_6H_5F	560,09	4,551	0,269	357	2,0104	127,91
Фторбромметан [34]	CH_2FBr	468	6,11	0,674	—	—	—
Фтордибромметан [34]	$CHFBr_2$	543,5	5,49	0,880	—	—	—
Фтордихлорбромметан [9]	$CFCl_2Br$	520	—	—	—	—	—
Фтордихлорметан (фреон-21) [9]	$CHFCl_2$	451,65 (50)	5,17 (10)	0,522 (10)	197	1,1512	90,831
Фторметан [9]	CH_3F	317,75 (50)	5,88 (5)	0,300 (5)	113	0,5010	56,190
Фтортрибромметан [9]	$CFBr_3$	591	—	—	—	—	—
Фтортрихлорметан (фреон-11) [9]	$CFCl_3$	471,15 (50)	4,38 (5)	0,554 (10)	248	1,4789	111,86
Фторхлорбромметан [34]	$CHFClBr$	507,5	5,35	0,707	—	—	—
Фторхлордибромметан [9]	$CFClBr_2$	570	—	—	—	—	—
Фторхлорметан [34]	CH_2FCl	424,83	6,00	0,443	—	—	—
1-Фтор-2-хлорэтан [9]	C_2H_4FCl	520 (15)	5,37 (30)	0,40 (2)	207	1,4684	100,63
Фторэтан [9]	C_2H_5F	375,31 (50)	4,72 (5)	—	—	0,8700	82,605
Фторэтен (винилфторид)	C_2H_3F	327,8	5,24	0,320	144	0,5982	65,031
Хлорбензол	C_6H_5Cl	632,4	4,52	0,365	308	2,5808	145,43
Хлорбромметан [34]	CH_2ClBr	555,5	6,32	0,669	—	—	—
Хлордибромметан [34]	$CHClBr_2$	654,4	5,75	0,83	—	—	—
Хлорметан (фреон-40) [9]	CH_3Cl	416,25 (10)	6,60 (1)	0,353 (10)	143	0,7660	65,581
Хлороформ [9]	$CHCl_3$	536,55 (50)	5,47 (20)	0,50 (3)	239	1,5344	101,91
дейтерированный [9]	$CDCl_3$	535,9 (1)	—	—	—	—	—
Хлорпропан	C_3H_7Cl	503	4,58	—	—	1,6110	114,14
3-Хлорпропен	C_3H_5Cl	514	—	—	—	—	—
Хлортрибромметан [34]	$CClBr_3$	674,67	5,02	0,968	—	—	—
Хлорэтан [9]	C_2H_5Cl	460,35 (50)	5,27 (5)	0,331	195	1,1729	90,800
Азотсодержащие соединения [23]							
Анилин	C_6H_7N	699	5,31	0,34	270	2,6837	136,82
Ацетонитрил	C_2H_3N	548	4,80	0,237	173	1,8120	117,83
Бензонитрил	C_7H_5N	690,4	4,22	—	—	3,2977	170,22

Вещество	Формула	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа	$\rho_{кр}$, г/см³	$V_{кр}$, см⁶/моль	a, $\frac{Н \cdot м^4}{моль^2}$	b, см³/моль
н-Бутиламин	C_4H_9N	524	4,15	—	—	1,9275	131,08
Бутиронитрил	C_4H_7N	582,2	3,79	—	—	2,6084	159,67
Диметиламин [9]	C_2H_7N	437,65 (50)	5,31 (5)	—	—	1,0520	85,664
N, *N*-Диметиланилин	$C_8H_{11}N$	687	3,63	—	—	3,7944	196,82
N, *N*-Диметил-*орто*-толуидин	$C_9H_{14}N$	668	3,12	—	—	4,1698	222,45
Ди-*н*-пропиламин	$C_6H_{15}N$	550	3,1	0,24	300	2,8085	181,97
Диэтиламин [9]	$C_4H_{11}N$	496,35 (50)	3,71 (5)	—	—	1,9373	139,09
Изоксазол	C_3H_3NO	552,0	—	—	—	—	—
Изохинолин	C_9H_9N	803	—	—	—	3,4688	198,74
Капронитрил	$C_{10}H_{19}N$	622,0	3,25				
2, 3-Лутидин	C_7H_9N	655,4	—	—	—	—	—
2, 4-Лутидин	C_7H_9N	647	—	—	—	—	—
2, 5-Лутидин	C_7H_9N	644,2	—	—	—	—	—
2, 6-Лутидин	C_7H_9N	623,8	—	—	—	—	—
3, 4-Лутидин	C_7H_9N	683,8	—	—	—	—	—
3, 5-Лутидин	C_7H_9N	667,2	—	—	—	—	—
Метиламин [9]	CH_5N	430,05 (50)	7,46 (5)	0,223 [28]	254 [28]	0,7232	59,930
N-Метиланилин	C_7H_9N	701	5,20	—	—	2,7569	140,15
Метилгидразин	CH_2N_2	567	8,035	0,170	271	1,1668	73,335
Нитродейтерометан [9]	CD_3NO_2	587,0	—	—	—	—	—
Нитрометан [9]	CH_3NO_2	588 (1)	6,31 (7)	0,352 (10)	173	1,5972	96,804
α-Пиколин	C_6H_7N	621	—	—	—	—	—
β-Пиколин	C_6H_7N	645	—	—	—	—	—
γ-Пиколин	C_6H_7N	646	—	—	—	—	—
Пиперидин	$C_5H_{11}N$	594,0	—	—	—	—	—
Пиридин	C_5H_5N	620,0	5,63	0,312	254	1,9898	114,37
Пиррол	C_5H_5N	639,8	—	—	—	—	—
Пирролидин	C_4H_9N	568,6	5,61	0,286	249	1,6796	105,27
н-Пропиламин	C_3H_9N	497,0	4,74	—	—	1,5191	108,92
Пропионитрил	C_3H_5N	564,4	4,185	0,240	230	2,2199	140,16
орто-Толуидин	C_7H_9N	693	3,75	—	—	3,7357	192,10
мета-Толуидин	C_7H_9N	709	4,15	—	—	3,5287	177,36
пара-Толуидин	C_7H_9N	667	2,38	—	—	5,4487	291,11
Триметиламин [9]	C_3H_9N	433,30 (10)	4,078 (5)	0,233 (3)	254	1,3428	110,44
Триэтиламин [9]	$C_6H_{15}N$	532 (10)	3,0 (5)	0,26	390	2,7152	181,88
Хинолин	C_9H_7N	782	—	—	—	—	—
Этиламин [9]	C_2H_7N	456,35 (50)	5,62 (5)	0,243	185	1,0800	84,335
Этилендиамин [9]	$C_2H_8N_2$	539 (5)	6,3 (3)	0,29 (1)	206	1,6324	98,099
Серосодержащие соединения [23]							
Диаллилсульфид	$C_6H_{10}S$	653	—	—	—	—	—
Диметилсульфид [9]	C_2H_6S	503,05 (50)	5,53 (2)	0,309	201	1,3339	94,498
Диэтилсульфид [9]	$C_4H_{10}S$	556,95 (50)	3,96 (5)	0,279	323	2,2833	146,10
Изопентилсульфид	$C_{10}H_{22}S$	664	—	—	—	—	—
Метилмеркаптан	CH_4S	470,0	7,24	0,332	145	0,8904	67,515
Метилэтилсульфид	C_3H_8S	553	4,26	—	—	2,0956	135,04
Тетрагидротиофен	C_4H_8S	632,0	—	—	—	—	—
Тиофен	C_4H_4S	579,4	5,695	0,385	219	1,7192	105,74
Этилдисульфид	$C_4H_{10}S_2$	642	—	—	—	—	—
Этилмеркаптан [9]	C_2H_6S	498,65 (50)	5,49 (5)	0,300	207	1,3204	94,362
Кремнийорганические соединения [32]							
Диметилдихлорсилан	$C_2H_6Cl_2Si$	520,35	3,49	0,369	—	2,2654	155,14
Триметилдихлорсилан	C_3H_9ClSi	497,75	3,20	0,297	—	2,2565	161,56
Триэтилхлорсилан	$C_2H_5Cl_3Si$	559,95	3,33	0,406	—	2,7429	174,56
Смеси [28]							
Даутерм (48% дибензила, 58% нафталина)	—	801	—	—	—	—	—
Даутерм (73,5% дифенилового эфира, 26,5% дифенила)	—	801	4,15	—	—	4,5037	200,38

параметрами вещества) и при которых уравнение состояния вещества удовлетворяет условиям $(\partial P/\partial V)_T=0$, $(\partial^2 P/\partial V^2)_T=0$. Состояние, соответствующее критическим параметрам, называется критическим состоянием или критической точкой вещества. По современным представлениям критическая точка является изолированной точкой фазового перехода второго рода и одновременно конечной точкой фазового перехода первого рода жидкость — пар [7, 8]. Критическая точка характеризуется рядом физических явлений (исчезновение мениска, так называемая критическая опалесценция, бесконечная сжимаемость, бесконечная теплоемкость при постоянном объеме и т. д.), которые протекают идентично во всех веществах и определяются самыми общими свойствами межмолекулярных сил. В табл. 13.4—13.6 приведены значения критических параметров простых веществ, неорганических и органических соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жарков В. Н., Калинин В. А.** Уравнение состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М.: Наука. 1968.

2. **Новикова С. И.** Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука. 1974.

3. **Мейсон Э., Сперлинг Т.** Вириальное уравнение состояния: Пер. с англ./Под ред. В. В. Сычева. М.: Мир. 1972.

4. **Вукалович М. П., Новиков И. И.** Уравнение состояния реальных газов. М.—Л.: Госэнергоиздат. 1948.

5. **Бретшнайдер С.** Свойства газов и жидкостей: Пер. с польск./Под ред. П. Г. Романкова. М.—Л.: Химия. 1966.

6. **Термодинамические** свойства индивидуальных веществ/Под ред. В. П. Глушко. — 2-е изд. М.: Изд-во АН СССР. 1962. Т. 1, 2.

7. **Фишер М.** Природа критического состояния: Пер. с англ. М.: Мир. 1968.

8. **Уравнение** состояния газов и жидкостей. М.: Наука, 1975.

9. **Термические** константы веществ/Под ред. В. П. Глушко. Вып. 1—10. М.: Наука. 1965—1982.

10. **Ohse R. W., Tippelskirch H.**//High. Temp.-High Press. 1977. Vol. 9, № 4. P. 367—385.

11. **Herreman W.**//Cryogenics. 1980. Vol. 2, № 3. P. 133—134.

12. **Термодинамические** свойства индивидуальных веществ: Справочное издание. — 3-е изд./Под ред. В. П. Глушко. М.: Наука. 1978—1982. Т. 1—4.

13. **Kobe K. A., Lynn R. E.**//Chem. Rev. 1953. Vol. 52, № 1. P. 117—236.

14. **Мартынюк М. М., Каримходжаев И.**//Журн. физ.-хим., 1974. Т. XLVIII. Вып. 5. С. 1243—1245.

15. **Seydel U., Fucke W.**//J. Phys. 1978. Vol. F8. P. L157—L161.

16. **Goodwin R. D.**//J. Res. NBS. 1970. Vol. 74A2. P. 221—227.

17. **Rau H.**//J. Chem. Thermod. 1974. Vol. 6, № 6. P. 525—535.

18. **Rau H., Kutty T. R. N., Guedes de Carvalho J.**// J. Chem. Thermod. 1973. Vol. 5, № 2. P. 291—302.

19. **Hoshino H., Schmutzler R. W., Hensel F.**// Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1976. Bd 8, № 1. S. 27—31.

20. **Mathews J. F.**//Chem. Revs. 1972. Vol. 72, № 1. P. 71—100.

21. **Справочник** химика. Т. 1/Под ред. Б. П. Никольского. Л.: Химия. 1963.

22. **Свойства** неорганических соединений: Справочник/А. И. Ефимов и др. Л.: Химия. 1983.

23. **Kudchadker A. J., Alani G. H., Zwolinski B. J.**// Chem. Rev. 1968. Vol. 68. P. 659—735.

24. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз. 1963.

25. **Ambrose D., Townsend R.**//Trans. Farad. Soc. 1968. Vol. 64, № 550, part. 10. P. 2622—2631.

26. **Young C. L.**//Austral. J. Chem. 1972. Vol. 25, № 8. P. 1625—1630.

27. **Ambrose D. e. a.** //J. Chem. Thermod. 1975. Vol. 7, № 12. P. 1143—1157.

28. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. — 1-е изд. М.: Атомиздат. 1976.

29. **Redlich O., Kwong J. N. S.** Chem. Rev. 1949. Vol. 44, № 1. P. 233—244.

30. **Redlich O.** Thermodynamics: Fundamentals, Application Elsevier. Amsterdam, 1976.

31. **Beattie J. A., Bridgeman O. C.**//J. Amer. Chem. Soc. 1927. Vol. 49, № 7. P. 1665—1667.

32. **Benedict N., Webb G. B., Rubin L. C.**//J. Chem. Phys. 1940. Vol. 8, № 4. P. 334—345.

33. **Таблицы** стандартных справочных данных. ГСССД 49—83. М.: Изд-во стандартов. 1984.

34. **Перельштейн И. И., Парушин Е. Б.** Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов. М.: Легкая и пищевая промышленность. 1984.

ГЛАВА 14
ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Б. Д. Сумм

14.1. ВВЕДЕНИЕ

Поверхностное натяжение представляет собой основную термодинамическую характеристику поверхностного слоя жидкостей и твердых тел на границе с различными фазами (газами, жидкостями, твердыми телами). Поверхностное натяжение обусловлено межмолекулярными (межатомными) взаимодействиями. Оно возникает потому, что на поверхности молекулы взаимодействуют не только с соседними молекулами данной фазы (как в ее объеме), но и с ближайшими молекулами соседней фазы.

Поверхностное натяжение σ имеет два определения [1, 2]:

энергетическое — удельная свободная поверхностная энергия, Дж/м^2;

силовое — сила, которая обусловлена межмолекулярными взаимодействиями и действует на единицу длины контура, ограничивающего поверхность данной фазы, Н/м. Эта сила направлена тангенциально (по поверхности) и перпендикулярно ограничивающему контуру.

Для жидкостей оба определения совпадают. Для твердых тел они не эквивалентны.

Наряду с поверхностным натяжением σ в термодинамике используется понятие полной поверхностной энергии $\varepsilon=\sigma+\eta T$, где η — поверхностная энтропия; ε не зависит от температуры T.

Для многих однокомпонентных неассоциированных жидкостей (вода, органические вещества, расплавы солей, жидкие металлы) вдали от критической точки зависимость $\sigma(T)$ близка к линейной: $\sigma=\sigma_0-\alpha(T-T_0)$, где σ_0 — поверхностное натяжение при температуре T_0; температурный коэффициент $\alpha\approx 0{,}1$ мДж/(м$^2\cdot$К) в достаточно широком интервале температур. При критической температуре $\sigma=0$.

Поверхностное натяжение входит во многие уравнения физики, физической и коллоидной химии, электрохимии, оно определяет следующие величины [1—4].

1. Капиллярное давление P_K жидкости, Па, под искривленной поверхностью (уравнение Лапласа):

$$P_K = \sigma\,(1/r_1 + 1/r_2), \qquad (1)$$

где r_1 и r_2 — главные радиусы кривизны. Для выпуклой поверхности $r>0$, для вогнутой $r<0$. В случае сферической поверхности $P_K=\pm 2\sigma/r$, где r — радиус сферы.

2. Краевой угол смачивания θ, образуемый жидкостью возле поверхности твердого тела (уравнение Юнга):

$$\cos\theta = (\sigma_т - \sigma_{тж})/\sigma_ж, \qquad (2)$$

где $\sigma_т$ и $\sigma_ж$ — поверхиостное натяжение твердого тела и жидкости на границе с окружающей средой; $\sigma_{тж}$ — поверхностное натяжение на границе твердое тело — жидкость;

3. Давление насыщеиного пара P_r, Па, над искривленной поверхностью жидкости (уравнение Кельвина):

$$P_r = P_0 \exp(2\sigma V_m/rRT), \qquad (3)$$

где V_m — молярный объем жидкости, м^3/моль; P_0 — давление пара над плоской поверхностью, Па; r — радиус кривизны, м; $R=8{,}314$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная;

4. Адсорбцию веществ, самопроизвольно концентрирующихся на поверхности раздела фаз (уравнение Гиббса):

$$\Gamma = -d\sigma/d\mu, \qquad (4)$$

где Γ — удельная адсорбция (масса вещества, адсорбированного на единице площади, моль/м^2); μ — химический потенциал этого вещества в фазе, из которой оно адсорбируется, Дж/моль. В случае разбавленных растворов

$$\Gamma = (-d\sigma/dc)\,c/RT, \qquad (4а)$$

где c — молярная концентрация раствора, моль/м^3;

5. Состояние адсорбционного слоя поверхностно-активного вещества на поверхности жидкости (уравнение Фрумкина—Фольмера):

$$(\pi + a/A^2)(A - b) = kT, \qquad (5)$$

где $\pi=\sigma_0-\sigma$ — двумерное (поверхностное) давление, Н/м; σ_0 и σ — поверхностное натяжение чистой жидкости и жидкости при наличии адсорбциоиного слоя; a — константа (аналог константы Ван-дер-Ваальса), Дж·м^2; A — площадь поверхностного слоя, приходящаяся на 1 молекулу адсорбированного вещества, м^2; b — собственная площадь этой молекулы, м^2; k — константа Больцмана, Дж/К;

6. Электрокапиллярный эффект (уравнение Липпмана):

$$-d\sigma/d\varphi = \rho_s, \qquad (6)$$

где ρ_s — плотность поверхностного заряда, Кл/м^2; φ — потенциал электрода, В;

7. Дифференциальную емкость двойного электрического слоя C, Ф:

$$C = d^2\sigma/d\varphi^2. \quad (7)$$

8. Равновесную форму (огранку) кристаллов (уравнение Гиббса—Кюри—Вульфа):

$$\sigma_1/h_1 = \sigma_2/h_2 = \ldots = \sigma_i/h_i, \quad (8)$$

где σ_i — поверхностное натяжение грани кристалла; h_i — ее расстояние от центра кристалла;

9. Работу образования W_c критического зародыша при образовании новой фазы (уравнения Гиббса), Дж. При гомогенном образовании:

а) конденсация пара при давлении P

$$W_c = 16\pi\sigma^3 V_m^2/3(RT\ln P/P_0)^2, \quad (9а)$$

где V_m — молярный объем жидкости, м^3/моль; P_0 — давление насыщенного пара над плоской поверхностью жидкости; P/P_0 — относительное пересыщение;

б) кристаллизация из пересыщенного раствора концентрации c

$$W_c = 16\pi\sigma^3 V_m^2/(3RT\ln c/c_0)^2, \quad (9б)$$

где c_0 — концентрация насыщенного (равновесного) раствора при данной температуре T;

в) кристаллизация из расплава

$$W_c = 16\pi\sigma^3 (V_m T_{пл}/L\Delta T)^2, \quad (9в)$$

где $T_{пл}$ — температура плавления; $T_{пл} - T = \Delta T$ — переохлаждение; L — молярная теплота плавления, Дж/моль;

10. Идеальную (теоретическую) $P_{ид}$ и реальную $P_{рл}$, Н/м^2, прочности твердых тел (уравнения Поляни—Смекала и Гриффитса):

$$P_{ид} = (2\sigma_т E/\delta)^{1/2}; \quad (10а)$$

$$P_{рл} = (2\sigma_т E/\pi l)^{1/2}, \quad (10б)$$

где E — модуль Юнга, Н/м^2; δ — межмолекулярное (межатомное) расстояние; l — длина зародышевой трещины, которая при напряжении $P_{рл}$ начинает самопроизвольно расти;

11. Длину капиллярных волн λ на поверхности жидкости (уравнение Кельвина):

$$\sigma = \lambda^3\rho/2\pi\tau^2 - g\lambda^2\rho/4\pi^2, \quad (11)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м^3; τ — период колебаний, с; g — ускорение свободного падения, м/с^2;

12. Упругость жидких пленок со слоем поверхностно-активного вещества (уравнение Гиббса):

$$E_s = 2(d\sigma/d\ln s), \quad (12)$$

где E_s — модуль упругости пленки, Н/м; s — ее площадь, м^2;

13. Число Бонда Bo, определяющее соотношение гравитационных и капиллярных сил:

$$Bo = (\rho' - \rho'')\, gl^2/\sigma, \quad (13)$$

где ρ' и ρ'' — плотность жидкости и окружающей среды; l — характерный размер, например диаметр сосуда;

14. Число Вебера We, определяющее отношение сил инерции к капиллярным силам:

$$We = \rho v^2 l/\sigma, \quad (14)$$

где v — скорость течения.

Поверхностное натяжение жидкостей измерено для многих чистых веществ и смесей (растворов, расплавов) в широком интервале температур, давлений, составов жидкости и для различной природы граничной фазы. Для твердых тел измерения $\sigma_т$ и $\sigma_{тж}$ сопряжены с большими трудностями. Одно из главных затруднений заключается в том, что работа образования новой поверхности твердого тела включает, как правило, дополнительные (необратимые) затраты на пластическую деформацию. Для измерения поверхностного натяжения жидкостей применяют различные методы [1, 2].

Необходимо подчеркнуть, что поверхностное натяжение большинства веществ очень чувствительно к наличию примесей в самой фазе и в граничной фазе. Поэтому измерения разных авторов даже одним методом обычно дают неодинаковые значения σ для одних и тех же веществ. При отборе данных для настоящего справочника в большинстве случаев использовались сведения последних публикаций.

14.2. СЖИЖЕННЫЕ ГАЗЫ

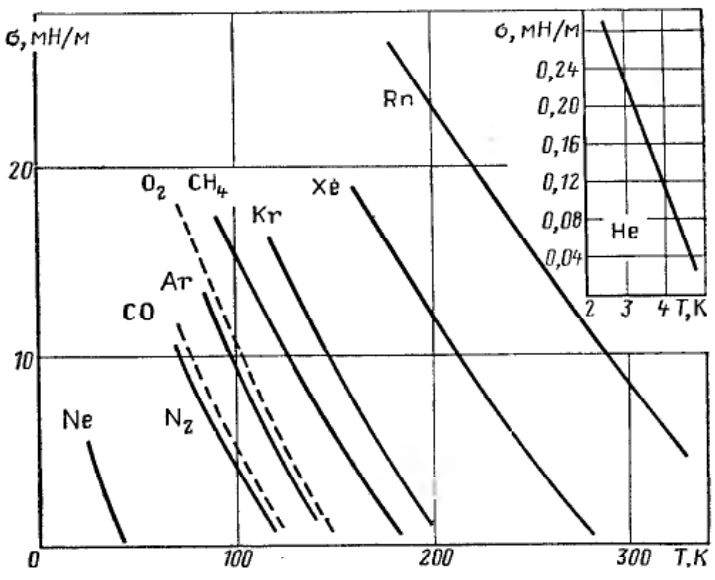


Рис. 14.1. Поверхностное натяжение сжиженных газов

Таблица 14.1. **Поверхностное натяжение водорода и его изотопов, мН/м, в зависимости от температуры T, К [5]**

T	σ	T	σ	T	σ	T	σ
Нормальный водород $н$-H_2		Нормальный дейтерий $н$-D_2		Параводород *пара*-H_2		Ортодейтерий *орто*-D_2	
20,55	1,898	20,57	3,437	20,70	1,818	20,91	3,355
20,86	1,844	20,96	3,346	21,14	1,749	21,28	3,278
21,51	1,729	21,00	3,338	22,47	1,524	21,29	3,278
22,07	1,638	21,64	3,201	22,56	1,509	21,88	3,141
22,10	1,629	22,08	3,127	23,07	1,421	21,92	3,139
22,21	1,616	22,28	3,062	23,68	1,318	22,66	2,980
22,59	1,547	22,91	2,930	24,09	1,252	23,05	2,895
23,23	1,437	22,95	2,924	24,45	1,189	23,41	2,811
24,14	1,282	23,35	2,839	24,51	1,175	24,22	2,632
24,63	1,198	23,61	2,777	25,19	1,065	25,00	2,462
25,04	1,129	24,30	2,634	25,54	1,006	25,04	2,448
25,33	1,084	24,95	2,493	25,94	0,944	25,49	2,347
25,83	0,998	25,50	2,375	26,41	0,867	26,00	2,235
26,27	0,929	25,92	2,275	26,73	0,817	26,56	2,117
26,69	0,857	26,52	2,159	27,17	0,744	27,12	1,999
26,99	0,811	27,28	1,983	27,50	0,692	27,51	1,914
27,32	0,758	27,33	1,973	27,99	0,616	28,09	1,787
27,70	0,693	28,43	1,743	28,00	0,615	28,50	1,697
28,46	0,578	29,00	1,621	28,46	0,543	29,44	1,493
29,00	0,498	29,95	1,428	28,75	0,499	30,04	1,379
29,40	0,438	30,87	1,240	29,02	0,461	30,52	1,275
29,59	0,410	31,47	1,119	29,51	0,388	30,98	1,181
30,01	0,351	32,95	0,824	29,70	0,360	31,51	1,075
30,45	0,289	33,93	0,637	30,00	0,320	32,41	0,899
30,53	0,281	34,51	0,538	30,44	0,258	32,49	0,887
30,96	0,226	34,53	0,531	30,48	0,255	33,48	0,699
31,06	0,210	35,14	0,425	30,99	0,191	34,03	0,597
31,58	0,149	35,50	0,364	31,11	0,175	34,41	0,537
31,95	0,107	35,93	0,294	31,62	0,114	34,98	0,432
—	—	36,32	0,235	—	—	35,53	0,342
—	—	36,70	0,181	—	—	36,03	0,264
—	—	—	—	—	—	36,05	0,261

14.3. ВОДА

Таблица 14.2. **Поверхностное натяжение воды σ, мН/м, в зависимости от температуры t, °С [7]**

t	σ	t	σ	t	σ	t	σ
0	75,50	130	52,90	260	23,73	362	1,53
10	74,40	140	52,79	270	21,33	363	1,37
20	72,88	150	48,68	280	18,94	364	1,22
30	71,20	160	46,51	290	16,60	365	1,07
40	69,48	170	44,38	300	14,29	366	0,93
50	67,77	180	42,19	310	12,04	367	0,79
60	66,07	190	40,00	320	9,84	368	0,66
70	64,36	200	37,77	330	7,69	369	0,54
80	62,69	210	35,51	340	5,61	370	0,42
90	60,79	220	33,21	350	3,64	371	0,31
100	58,91	230	30,88	355	2,71	372	0,20
110	56,97	240	28,52	360	1,85	373	0,10
120	54,96	250	26,13	361	1,68	374,15	0

14.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Таблица 14.3. **Поверхностное натяжение предельных углеводородов от CH_4 до C_8H_{18}, мН/м, в зависимости от температуры t, °С [7]**

Вещество	t	σ	Вещество	t	σ
Метан CH_4	—180	18		40	16,31
	—170	15,8		60	14,23
	—160	13,7		80	12,24
Этан C_2H_6	—160	28,08		100	10,27
	—150	26,34		120	8,34
	—140	24,62		140	6,51
	—130	22,91		160	4,74
	—120	21,23		180	3,16
	—110	19,57		200	1,74
	—100	17,93		210	1,12
	—90	16,31		220	0,58
Пропан C_3H_8	—130	27,8	Гептан $н$-C_7H_{16}	20	20,86
	—120	26,3		30	19,54
	—110	24,9		40	18,47
	—100	23,4		60	16,39
	—90	22,0		80	14,35
	—80	20,6		100	12,47
	—70	19,2		120	10,63
	—60	17,85		140	8,87
	—50	16,49		160	7,19
	—40	15,15		180	5,59
Бутан $н$-C_4H_{10}	—100	27,2		200	4,07
	—90	25,9		220	2,63
	—80	24,6		230	1,94
	—70	23,4		240	1,29
	—60	22,1	Октан $н$-C_8H_{18}	—40	27,50
	—50	20,88		—20	25,50
	—40	19,65		0	23,70
	—30	18,43		10	22,73
Изобутан *изо*-C_4H_{10}	—100	25,2		20	21,76
	—90	23,9		30	20,79
	—80	22,6		40	19,78
	—70	21,4		60	17,82
	—60	20,14		80	15,94
	—50	18,90		100	14,13
	—40	17,68		120	12,39
	—30	16,48		140	10,70
Пентан $н$-C_5H_{12}	—20	20,5		160	9,07
	—10	19,3		180	7,50
	0	18,2		200	5,99
	10	17,1		220	4,52
	20	16,00		230	3,80
	25	15,48		240	3,10
	30	14,95	Изооктан *изо*-C_8H_{18}	0	20,58
	40	13,80		10	18,77
Изопентан *изо*-C_5H_{12}	—20	19,40		25	18,32
	—10	18,27		30	17,88
	0	17,17		40	16,99
	10	16,08		50	16,11
	20	15,00		60	15,24
	25	14,46		70	14,40
	30	13,93		80	13,50
Гексан $н$-C_6H_{14}	0	20,56		90	12,70
	10	19,51			
	20	18,46			
	30	17,40			

Таблица 14.4. **Поверхностное натяжение σ нормальных предельных углеводородов (C_nH_{2n+2}) от C_9H_{20} до $C_{20}H_{42}$, мН/м [7]**

Вещество	t, °С								
	0	10	20	25	30	40	50	75	100
Нонан	24,84	23,90	22,96	22,49	22,01	21,07	20,13	17,78	15,42
Декан	25,73	24,81	23,89	23,43	22,98	22,06	21,14	18,84	16,54
Ундекан	26,57	25,68	24,78	24,34	23,89	23,00	22,10	19,87	17,63
Додекан	27,24	26,34	25,48	25,04	24,60	23,72	22,85	20,65	18,45
Тридекан	27,87	27,00	26,13	25,69	25,26	24,39	23,52	21,34	19,16
Тетрадекан	—	27,56	26,69	26,26	25,83	24,97	24,11	21,94	19,79
Пентадекан	—	28,02	21,17	26,74	26,32	25,46	24,61	22,48	20,35
Гексадекан	—	—	27,64	27,22	26,79	25,95	25,11	23,00	20,90
Гептадекан	—	—	—	27,64	27,22	26,38	25,54	23,45	21,35
Октадекан	—	—	—	—	27,59	26,75	25,92	23,84	21,75
Нонадекан	—	—	28,7	28,2	27,8	26,9	26,0	—	22,5
Эйкозан	—	—	29,0	28,6	28,1	27,2	26,4	—	23,0

Таблица 14.5. **Поверхиостное натяжение непредельиых углеводородов рядов этилена и ацетилена и диолефинов, мН/м, в зависимости от температуры t, °С [7]**

Вещество	t	σ	Вещество	t	σ
Этилен C_2H_4	—120	19,50	Октен-1 C_8H_{16}	0	23,83
	—110	17,65		10	22,87
	—100	15,71		20	21,97
				25	21,44
Гексен-1 C_6H_{12}	0	20,58		30	20,95
	10	19,55		40	19,99
	20	18,52		50	19,03
	25	18,00		75	16,64
	30	17,49		100	14,24
	40	16,46			
	50	15,43	Ацетилен C_2H_2	—80	18,92
				—70	16,99
Гептен-1 C_7H_{14}	0	22,40		—60	15,06
	10	21,41		—50	13,13
	20	20,42			
	25	19,93	Пропадиен C_3H_4	—50	21,99
	30	19,43		—40	20,44
	40	18,44		—30	18,90
	50	17,45		—20	17,35
	75	14,98			

Таблица 14.6. **Поверхностное натяжение циклических углеводородов, мН/м, в зависимости от температуры t, °С [7]**

Вещество	t	σ	Вещество	t	σ
Циклопентен C_5H_8	0	25,25	Циклопентан C_5H_{10}	13,5	23,30
	10	23,94			
	20	22,65	Циклогексен C_6H_{10}	0	29,00
	25	21,99		10	27,80
	30	21,32		20	26,61
	40	20,03		25	26,01

Продолжение табл. 14.6

Вещество	t	σ	Вещество	t	σ
Циклогексен C_6H_{10}	30	25,41	Анилин $C_6H_5NH_2$	0	45
	40	24,22		10	44
	50	23,02		20	42,9
	75	20,03		30	41,8
				40	40,7
Метилциклопентан C_6H_{12}	13,5	24,10		50	39,5
				100	33,7
				150	27,9
Циклогексан C_6H_{12}	10	26,15		180	24,6
	20	24,95			
	25	24,35	Хлорбензол C_6H_5Cl	0	36,0
	30	23,75		10	34,8
	40	22,45		20	33,5
	50	21,35		30	32,3
	75	18,35		40	31,1
				60	28,7
Метилциклогексан C_7H_{14}	0	25,80		80	26,4
	10	24,74		100	24,0
	20	23,68		150	18,5
	30	23,15		200	13,2
	40	22,62		250	8,3
	50	21,56		300	3,9
	60	20,50		310	3,1
	70	17,58		320	2,4
	100	15,20		330	1,7
Этилциклогексан C_8H_{16}	0	27,87	Нитробензол $C_6H_5NO_2$	0	46,4
	10	26,77		10	45,2
	20	25,67		20	43,9
	25	25,12		30	42,7
	30	24,57		40	41,5
	40	23,47		60	39,0
	50	22,37		100	34,4
	75	19,62		150	29,0
	100	16,87		200	23,6

Таблица 14.7. **Поверхностное натяжение σ ароматических углеводородов, мН/м [7]**

Вещество	t, °C									
	0	10	20	25	30	40	50	60	80	100
Бензол C_6H_6	—	30,24	28,88	28,18	27,49	26,14	24,88	23,66	21,2	—
Толуол C_7H_8	30,92	29,70	28,53	27,29	27,32	26,15	25,04	23,94	21,8	19,6
орто-Ксилол C_8H_{10}	32,28	31,16	30,03	29,48	28,93	27,84	26,76	25,70	23,6	21,5
мета-Ксилол C_8C_{10}	30,92	29,78	28,63	28,08	27,54	26,44	25,36	24,26	22,2	20,1
пара-Ксилол C_8H_{10}	—	—	28,31	27,76	27,22	26,13	25,06	24,02	22,0	20,1
Этилбензол C_8H_{10}	31,38	30,18	29,04	28,48	27,93	26,79	25,74	24,74	22,7	20,7
изо-Пропилбензол (кумол) C_9H_{12}	—	—	28,20	27,68	27,17	26,09	25,08	24,07	22,2	—

Таблица 14.8. **Поверхностное натяжение галоидопроизводных углеводородов, мН/м, в зависимости от температуры t, °C [7]**

Вещество	t	σ
Дифтордихлорметан (фреон-12) CF_2Cl_2	20	9,0
	30	7,5
Трифторхлорметан (фреон-13) CF_3Cl	—30	23,5
	—20	22,0
	—10	20,5
	0	18,5
	10	17,3
	20	16,0
	30	14,0
Хлористый метил CH_3Cl	0	12,0
	10	11,0

Продолжение табл. 14.8

Вещество	t	σ
Четыреххлористый углерод CCl_4	0	29,5
	10	28,2
	20	26,9
	40	24,5
	60	22,1
	80	19,7
	100	17,3
	150	11,7
	200	6,5
	250	2,1
	260	1,4
	270	0,7

Таблица 14.9. **Поверхиостное натяжение σ спиртов, эфиров, кетонов и органических кислот, мН/м [7]**

Вещество	t, °C									
	0	10	20	30	50	100	150	200	220	240
Метиловый спирт CH_3OH	24,5	23,5	22,6	21,8	20,1	15,7	10,4	4,5	2,1	—
Этиловый спирт C_2H_5OH	24,4	23,6	22,8	21,9	20,1	15,5	10,1	4,3	2,2	0,1
Изопропиловый спирт C_3H_7OH	25,5	24,6	23,8	23,0	21,2	17,2	—	—	—	—
Бутиловый спирт C_4H_9OH	26,2	25,4	24,6	23,8	22,1	17.8	—	—	—	—
Глицерин $C_3H_5(OH)_3$	—	—	59,4	59,0	58,0	54,2	48,8	—	—	—
Эфир диэтиловый $C_4H_{10}O$	19,4	18,2	17,0	15,8	13,5	8,0	3,1	—	—	—
Этилацетат $C_4H_8O_2$	27,0	25,6	24,3	23,0	20,5	14,4	8,7	3,7	2,0	0,5
Ацетон C_3H_6O	26,2	25,0	23,7	22,5	19,9	—	—	—	—	—
Уксусная кислота CH_3COOH	—	—	27,8	26,8	24,8	19,8	15,0	10,4	8,5	5,7

Таблица 14.10. **Поверхностное натяжение органических жидкостей на границе с водой при 20 °С, мН/м [4]**

Вещество	σ
Амилацетат	12,0
Амиловый спирт	4,4
Анилин	5,8
Бензальдегид	15,5
Бензол	35,0
Бромбензол	38,1
Бромоформ	40,0
Бутиловый спирт	1,8
Гексан	49,4
Гексадекан	52,6
Гексиловый спирт	6,8
Гептан	50,2
Гептиловый спирт	7,7
Декан	51,2
Дибромэтан	36,5
Дихлорметан	28,3
Дихлорэтан	31,0
Диэтиловый эфир	10,7
Додекан	51,8
Изоамиловый спирт	4,8
Изобутиловый спирт	2,0
Изовалериановая кислота	2,7
Изооктан	51,0
Изопентан	49,0
Иодбензол	41,8
Каприловая кислота	8,2
Капроновая кислота	5,2
мета-Ксилол	37,9
орто-Ксилол	36,1
пара-Ксилол	37,8
Мезитилен	38,7
Метилбензоат	16,6
Нитробензол	25,7
мета-Нитротолуол	27,7
орто-Нитротолуол	27,2
Октан	50,8
Октановый спирт	8,5
Олеиновая кислота	15,7
Пентан	49,0
Сероуглерод	48,4
Стирол	34,0
Тетрадекан	52,2
Тетрахлорэтилен	47,5
Толуол	36,1
Фурфурол	5,1
Хлорбензол	37,4
Хлороформ	31,6
Четыреххлористый углерод	45,0
Циклогексан	50,2
Циклогексанол	3,9
Цимол	34,6
Этилбензол	38,4
Этилбромид	31,2

14.5. ЖИДКИЕ МЕТАЛЛЫ

Таблица 14.11. **Поверхностное натяжение σ жидких щелочных металлов, мН/м [7]**

t, °С	Li	Na	K	Rb	Cs
29	—	—	—	—	71,3
39	—	—	—	87,5	—
64	—	—	109	—	—
100	—	197,8	106,6	84,0	67,9
200	395	187,8	100	78,2	63,1
300	381	177,8	93,4	72,4	58,3
400	367	167,8	86,8	66,4	53,5
500	353	157,8	80,2	60,8	48,7
600	339	147,8	73,6	55,0	43,9
700	325	137,8	67,0	49,2	39,1
800	311	127,8	60,4	43,4	34,3
900	297	117,8	53,8	37,6	29,5
1000	283	107,8	47,2	31,8	24,7
1100	269	97,8	40,6	26,0	19,9
1200	255	87,8	34,0	20,2	15,1
1300	241	77,8	27,4	14,4	10,3
1400	227	67,8	20,8	8,6	—
1500	223	57,8	14,2	—	—

Таблица 14.12. **Поверхностное натяжение жидких металлов, мН/м, в зависимости от температуры *t*, °С [8]**

Металл	*t*	σ
Алюминий [9]	660	915
	800	850
	1000	830
	1100	820
	1600	725
	1830	680
Барий [10]	1273	267,3
	1373	259,7
	1473	253,0
	1573	246,3
	1673	239,6
	1773	232,9
	1873	226,2
	1973	219,4
	2073	212,7
	2173	206,0
	2273	199,3
Бериллий	1500	1100 ± 35
Бор	2200	1060
Ванадий	1919	1950
Висмут	280	372,1
	300	371,0
	400	364,6
	500	357,9
	800	343
	900	336
	1000	328
Вольфрам	3395	2316
Гадолиний	1350	670
Галлий	50	706
	100	705
	200	704
	300	699
	400	694
	450	690

Продолжение табл. 14.12

Металл	t	σ
Гафний	2200	1630
Германий	1100	604,5
	1100	594
	1550	558
Диспрозий	1407	490
Железо	1550	1850
	1600	1830
	1650	1790
	1700	1760
Золото	1100	1125
Индий	200	556,0
	300	547,4
	400	535,0
	500	531,2
	600	522,5
	700	512,8
	800	2504,6
Иридий	2454	250
Иттрий	1450	877
Кадмий	330	560
Кальций	851	1370
Кобальт	1550	1830
	1600	770
Кремний	1550	750
Лантан	810	745
Магний [11]	670	552
	700	542
	720	534
	740	528
Марганец	1350	1070
	1550	1030
Медь	1150	1370
	1550	1265
Молибден	2622	2225
Неодим	840	688
Никель	1550	1735
	1850	1620
Ниобий	2468	2040
Олово	300	530
	350	537
	450	535
	500	531
	600	525
	650	514
Осмий	2700	2500
Палладий	1554	1500
	1600	1460
Платина	1760	1800
	1800	1699(20)
Празеодим	940	706
Рений	3180	2700
Родий	1966	2000
Ртуть	25	465
	50	462
	100	452
	150	439
	200	429
	250	416
	300	402
Рутений	350	387
Свинец	2500	2250
	350	440
	450	428
	750	420
	800	412
	1000	388

Продолжение табл. 14.12

Металл	t	σ
Селен	220	105
	240	104
	280	101
	340	87
	380	80
Серебро	1000	907
	1100	894
	1200	876
Стронций [10]	797	288—292
	1373	286,1
	1473	280,3
	1573	274,4
	1673	268,6
	1773	262,7
	1873	256,8
	1973	251,0
	2073	245,1
	2173	239,3
	2273	233,4
Сурьма	650	350,2
	700	347,6
	750	346,2
	800	345,0
Таллий	302	464,5
Тантал	2996	2140—2150
Теллур	452	179
Тербий	1356	700
Титан	1672	1558
	1727	1460
Уран	1130	1550
Хром	1830	1540
Цинк	420	767 (5)
Цирконий	1855	1455
	2460	1395

Таблица 14.13. **Влияние кислорода и углерода на поверхностное натяжение железа [8]**

Массовое содержание, %	σ, мН/м	Массовое содержание, %	σ, мН/м
Кислород, $t = 1570$ °С		*Углерод*, $t = 1550$ °С	
0,0006	1717	0,42	1847
0,0077	1632	2,25	1822
0,02	1541	3,15	1793
0,041	1362	3,50	1805
0,07	1151	4,15	1788

14.6. РАСПЛАВЫ СОЛЕЙ

Таблица 14.14. **Поверхностное натяжение расплавленных солей [1]**

Вещество	t, °С	σ, мН/м	Вещество	t, °С	σ, мН/м
$BiCl_3$	271	66,0	$NaNO_3$	308	116,6
$KClO_3$	368	81,0	$K_2Gr_2O_7$	397	129,0
KNCs	175	101,5	$Ba(NO_3)_2$	595	134,8

Таблица 14.15. **Удельная свободная поверхностная энергия твердых металлов [12]**

Металл	t, °С	Атмосфера	$\sigma_т$, мДж/м²
Алюминий	180	Вакуум	1140±200
Бериллий	700	Гелий	1000
Висмут	239	Вакуум, Аргон	521±6
Вольфрам	1500	Вакуум	2830±470
	1757	Вакуум	2900±290
Железо	1460	Аргон	1910±190
	1410	Водород	2320±80
γ-Железо	1380	Аргон	2170±300
Золото	970	Вакуум	1450±80
	1025	Гелий	1400±65
	968	Воздух	1390±80
Индий	142	Вакуум, Аргон	633±7
Кобальт	1354	Водород	1970±175
Медь	1006	Гелий, Водород	1720
Молибден	1427	Вакуум	2200±200
	1600	Аргон	2100±200
	2500	Аргон	1920±200
Ниобий	2250	Вакуум	2100±100
Никель	1343	Аргон	1820±180
	1219	Вакуум	1860±190
Олово	215	Вакуум, Аргон	673±7
Платина	1310	Вакуум	2340±800
	1673	Воздух	1800±200
Свинец	309	Вакуум, Аргон	560±6
Серебро	750	Азот	1140±35
	909	Гелий	1140±90
Таллий	272	Вакуум, Аргон	562±6
Тантал	1500	Вакуум	2680±500
Титан	1600	Вакуум	1700
Цинк	480	Гелий	830
Цинк, плоскость (0001)	—195	Азот (жидкий)	410

Продолжение табл. 14.15

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Адамсон А.** Физическая химия поверхностей.: Пер. с англ. М.: Мир. 1979.
2. **Щукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А.** Коллоидная химия. М.: Изд-во МГУ. 1982.
3. **Гиббс Дж. В.** Термодинамика. Статистическая механика.: Пер. с англ. М.: Наука. 1982.
4. **Абрамзон А. А.** Поверхностно-активные вещества. — 2-е изд. Л.: Химия. 1981.
5. **Байдаков В. Г., Хвостов К. В., Скрипов В. П.** Капиллярная постоянная и поверхностное натяжение неона, водорода и его изотопов. Свердловск: Изд. Уральского научного центра АН СССР. 1981.
6. **Байдаков В. Г., Хвостов К. В., Муратов Г. Н., Скрипов В. П.** Капиллярная постоянная и поверхностное натяжение аргона, криптона, ксенона, метана, кислорода и азота. Свердловск: Изд. Уральского научного центра АН СССР. 1981.
7. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — 2-е изд. М.: Наука. 1972.
8. **Ниженко В. И., Флока Л. И.** Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов: Справочник. М.: Металлургия. 1981.
9. **Найдич Ю. В.** Контактные явления в металлических расплавах. Киев: Наукова думка. 1972.
10. **Шпильрайн Э. Э., Фомин В. А., Качалов В. В., Сокол Г. Ф., Сковородько С. Н.** Теплофизические свойства щелочноземельных металлов в жидкой фазе (плотность, поверхностное натяжение, вязкость). Обзор по теплофизическим свойствам веществ. М.: Изд. Науч.-информ. центра по теплофизическим свойствам чистых веществ АН СССР. 1983. № 2 (40).
11. **Андронов В. Н., Чекин Б. В., Нестеренко С. В.** Жидкие металлы и шлаки. М.: Металлургия. 1977.
12. **Миссол В.** Поверхностная энергия раздела фаз в металлах. М.: Металлургия. 1978.

ГЛАВА 15
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

А. В. Инюшкин

15.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Теплопроводность — молекулярный перенос теплоты (теплоперенос) в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температур. Коэффициент теплопроводности (как теперь принято, теплопроводность) определяется уравнением Фурье

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T,$$

где $\mathbf{q}$ — плотность теплового потока, Вт/м²; λ — теплопроводность, Вт/(м·К); ∇T — градиент температуры, К/м. Ниже приведены соотношения между единицами теплопроводности:

1 Вт/(см·К) = 1·10² Вт/(м·К)

1 эрг/(см·с·°С) = 1·10⁻⁵ Вт/(м·К)

1 $кал_{IT}$ /(см·с·°С) = 4,1868·10² Вт/(м·К)

1 $кал_{th}$/(см·с·°С) = 4,184·10² Вт/(м·К)

1 $ккал_{th}$/(м·ч·°С) = 1,16222 Вт/(м·К)

1 Btu_{IT}/(ft·h·°F) = 1,73073 Вт/(м·К)

1 Btu_{IT}·in/(ft²·h·°F) = 0,144228 Вт/(м·К)

1 Btu_{th}/(ft·h·°F) = 1,72958 Вт/(м·К)

1 Btu_{th}·in/(ft²·h·°F) = 0,144131 Вт/(м·К)

1 CHU/(ft·h·°F) = 3,1152 Вт/(м·К)

1 Вт/(м·К) = 1·10⁻² Вт/(см·К)

1 Вт/(м·К) = 1·10⁵ эрг/(см·с·°С)

1 Вт/(м·К) = 2,38846·10⁻³ $кал_{IT}$ /(см·с·°С)

1 Вт/(м·К) = 2,39006·10⁻³ $кал_{th}$/(см·с·°С)

1 Вт/(м·К) = 0,860421 $ккал_{th}$/(м·ч·°С)

1 Вт/(м·К) = 5,77789·10⁻² Btu_{IT}/(ft·h·°F)

1 Вт/(м·К) = 0,693347 Btu_{IT}·in/(ft²·h·°F)

1 Вт/(м·К) = 5,78176·10⁻² Btu_{th}/(ft·h·°F)

1 Вт/(м·К) = 0,693811 Btu_{th}·in/(ft²·h·°F)

1 Вт/(м·К) = 0,32100 CHU/(ft·h·°F)

Примечание. Международная калория: 1 $кал_{IT}$ = 4,1868 Дж (точное значение).
Термохимическая калория: 1 $кал_{th}$ = 4,1840 Дж.
Британская тепловая единица: 1 Btu_{IT} = 1,05505·10³ Дж.
1 Btu_{th} = 1,05435·10³ Дж.
1 CHU = 1899,1 Дж.

Уравнение Фурье справедливо для небольших значений градиента температуры (когда отклонение системы от равновесного состояния мало) и в случае, когда средняя длина свободного пробега частиц (квазичастиц), участвующих в теплопереносе, мала по сравнению с геометрическими размерами системы. Для кристаллических твердых тел коэффициент теплопроводности представляет собой симметричный тензор второго ранга.

Процесс распространения теплоты описывается уравнением теплопроводности, которое в простейшем случае имеет вид

$$\partial T/\partial t = (\lambda/c\gamma)\,\nabla^2 T,$$

где $T(x, y, z, t)$ — температура, К, в точке с координатами x, y, z; t — время, с; c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); γ — плотность, кг/м³; $\nabla^2 T = \partial^2 T/\partial x^2 + \partial^2 T/\partial y^2 + \partial^2 T/\partial z^2$, К/м²,

Экспериментальные методы определения теплопроводности основаны на решении уравнения теплопроводности [1, 2].

Теплопроводность зависит от агрегатного состояния вещества, его состава, чистоты, температуры, давления и других характеристик. Так, для большинства веществ теплопроводность жидкой фазы примерно в 10 раз больше, чем теплопроводность газообразной фазы, а для твердого тела она значительно выше, чем для жидкости около точки плавления (за исключением жидких висмута, олова, теллура).

На практике часто случается, что теплопроводность внутри тела и вблизи его границ различна. Это различие обусловлено как изменением условий протекания процессов теплопереноса, так и изменением структуры вещества (в результате термообработки, наклепа и т. д.). В таблицах этой главы приведены коэффициенты теплопроводности для части тела, удаленной на достаточное расстояние от границ.

Существенное влияние на теплопроводность могут оказывать внешние факторы, например облучение, изменение давления, магнитного поля.

В полупрозрачных средах теплопроводность сопровождается радиационным теплопереносом. Наблюдаемая эффективная теплопроводность таких сред есть сумма собственно теплопроводности и радиационного теплопереноса. Вклад раднационной составляющей комбинированного теплопереноса увеличивается с повышением температуры и становится существенным при температурах, составляющих несколько сотен градусов Цельсия.

Погрешность приведенных в настоящей главе данных о теплопроводности меняется в зависимости от вещества, области температур (как правило, увеличивается при низких и высоких температурах) и давлений (увеличивается с повышением давления). В основном погрешность значений теплопроводности составляет 10—20%. Для ряда веществ, изученных наилучшим образом, погрешность данных лежит в пределах 1—2%. Число значащих цифр в приведенных значениях λ в целом согласуется с их погрешностью. Однако в тех случаях, когда целесообразно показать характер изменения λ (например, в зависимости от состава вещества или температуры), число значащих цифр увеличено до трех.

Основные вопросы теории теплопроводности, а также экспериментальные методы исследований теплопроводности рассмотрены в [3].

15.2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРОСТЕЙШИХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

В табл. 15.1 собраны в основном *обобщенные* данные о теплопроводности веществ в диапазоне температур от 4 до 1000 К. В редких случаях приведены данные отдельных экспериментов.

Значения λ при средних и высоких температурах для твердых веществ близки к значениям коэффициента теплопроводности хорошо отожженных высокочистых (степень чистоты 99,99%) образцов.

При низких температурах теплопроводность твердых элементов сильно зависит от степени совершенства кристалла, наличия примесей и других дефектов. Значения λ при температурах вблизи и ниже температуры, соответствующей максимуму теплопроводности, относятся к наиболее чистым и совершенным образцам. Для металлов приведены значения остаточного удельного электрического сопротивления ρ_0 [либо отношения $\rho(300\ К)/\rho_0$], которые характеризуют качество образцов.

Теплопроводности простейших газообразных веществ приведены при давлении 10^5 Па.

В целом погрешность значений λ при средних температурах меняется от 2 до 10% в зависимости от вещества и возрастает до 20% при низких и высоких температурах.

Подробную информацию о теплопроводности элементов и оценки погрешностей можно найти в [4—7].

15.3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ

Теплопроводность разреженного газа слабо зависит от температуры (как $T^{0,5}$) и давления (табл. 15.2 и 15.3). Газ можно считать существенно разреженным до давления порядка 10^6 Па при комнатной температуре и до давления примерно $4 \cdot 10^6$ Па при $T \approx 1000$ К [8]. Для оценки теплопроводности разреженного газа применима формула Эйкена

$$\lambda = 10^2 \eta c_V / M \,[1 + (9/4) R/c_V],$$

где η — динамическая вязкость, Па·с; c_V — молярная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(моль·К); M — молярная масса, кг/моль; R — универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К).

При высоких давлениях λ зависит от давления. В табл. 15.4 приведены зависимости теплопроводности некоторых газов от давления. При низких давлениях, когда длина свободного пробега молекул сравнима с размерами сосуда (для большинства систем при $p<10$ Па), теплопроводность пропорциональна давлению газа и стремится к нулю с уменьшением давления. В этих условиях теплопроводность определяется не только свойствами газа, но и энергообменом на границах, который характеризуют коэффициентом аккомодации.

Результаты теоретического и экспериментального исследований различных аспектов теплопроводности газов приведены в [9—11]. Теплоперенос в зазоре, заполненном сильно разреженным газом, рассматривается в [12]. Экспериментальные данные о теплопроводности большинства изученных веществ в газообразном состоянии систематизированы в справочниках [6, 13, 14].

15.4. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

Теплопроводность жидкости при температуре 0 °С и атмосферном давлении с погрешностью ±10% может быть рассчитана по полуэмпирической формуле [15]

$$\lambda\,(0\,^\circ\mathrm{C}) = 9 \cdot 10^{-3} N^{-1/4} (T_{\text{кип}}\,\gamma)^{1/2} c_P,$$

где N — число атомов в молекуле жидкости; $T_{\text{кип}}$ — температура кипения, К; γ — плотность жидкости, г/см³; c_P — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(см³·К).

Теплопроводность жидкости увеличивается при понижении температуры (вода и глицерин представляют исключение). В интервале температур $-50 < t < 50$ °С зависимость $\lambda(t)$ может быть приближенно представлена выражением [15]

$$\lambda(t) = \lambda\,(0\,^\circ\mathrm{C})\,[1 + 0{,}01t\,(T_{\text{кип}}^{1/2}/23{,}5 - 1)],$$

где t — температура, °С. Теплопроводности жидкостей приведены в табл. 15.5 и 15.6.

У всех жидкостей теплопроводность увеличивается с ростом давления. Это увеличение практически несущественно до давлений $5 \cdot 10^6$ Па. При высоких давлениях, достигающих $1{,}2 \cdot 10^9$ Па, теплопроводность при температуре 0 °С можно рассчитать по формуле [15]

$$\lambda(p) = \lambda\,(0\text{ Па})\,[1 + (T_{\text{кип}}\,\gamma_0)^{-1/2} (p/1{,}44 \cdot 10^7)^{2/3}],$$

где γ_0 — плотность при $p=0$ Па, г/см³; p — избыточное давление, Па.

Теплопроводность жидкостей рассмотрена в [9, 11, 15, 16]. Экспериментальные данные собраны в [6, 13—15].

15.5. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ГЕЛ

Теплопроводность твердых тел в подавляющем большинстве случаев обусловлена двумя механизмами: движением электронов проводимости (электронная теплопроводность) и тепловыми колебаниями атомов решетки (фононная теплопроводность). Первый механизм доминирует в металлах, второй определяет теплопроводность неметаллов. В некоторых полупроводниках, полуметаллах и сильно разупорядоченных сплавах оба механизма дают сравнимые вклады в теплопроводность.

При низких температурах теплопроводность твердого тела существенно зависит от количества и типа примесей, дефектов решетки. Это обусловлено тем, что при низких температурах электроны в металлах сильно рассеиваются на дефектах атомного масштаба, а фононы в диэлектриках — на дефектах с размерами несколько сотен межатомных расстояний. В совершенных диэлектрических кристаллах при температурах около 1 К длина свободного пробега фононов сравнима с размерами образца (обычно равна примерно 5 мм). В этом случае теплопроводность зависит от характера процессов рассеяния фононов на границах образца и его размеров.

При высоких температурах длины свободного пробега носителей ограничены в металлах в основном электрон-фононным рассеянием, в неметаллах — фонон-фононным. Поэтому при высоких температурах теплопроводность твердых тел слабо зависит от примесей и дефектов.

В аморфных диэлектриках в широком диапазоне температур длина свободного пробега фононов ограничена рассеянием на дефектах структуры. Теплопроводность аморфных тел значительно меньше, чем теплопроводность кристаллов. Поликристаллические тела обладают промежуточной теплопроводностью между теплопроводностями монокристаллов и аморфных тел.

Теплопроводность металлов и сплавов можно оценить, используя закон Видемана—Франца:

$$\lambda = L_0 \sigma T,$$

где $L_0 = 2{,}445 \cdot 10^{-8}$ Вт·Ом/К² — число Лоренца; σ — электропроводность, $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$; T — температура, К. Для большинства металлов и сплавов закон Видемана—Франца справедлив при высоких и очень низких температурах. Для чистых металлов в области промежуточных температур этот закон дает завышенные значения λ. Для сплавов он дает заниженные значения теплопроводности (до 10 раз при температурах около 20 К для сильно разупорядоченных многокомпонентных сплавов).

В настоящей главе приведены теплопроводности некоторых технических сталей и сплавов (табл. 15.7—15.16), полупроводников (табл. 15.17), совершенных диэлектрических монокристаллов (табл. 15.18), стекол (табл. 15.19), огнеупорных материалов и высокотемпературных композиций ядерного топлива (табл. 15.20—15.24), строительных и теплоизоляционных материалов, древесины, горных пород и прочих веществ (табл. 15.25—15.29).

Теория теплопереноса в твердых телах и экспериментальные данные о теплопроводности рассмотрены в [17—20]. Введение в теорию теплопроводности твердых тел и жидкостей под давлением, методы измерений, экспериментальные данные обсуждаются в [21]. Большое количество данных о теплопроводности твердых тел приведено в справочниках [7, 22—25].

Таблица 15.1. Теплопроводности простейших химических веществ, Вт/(м·К) [4]

Элемент	T, К											
	4	10	20	40	80	150	200	300	400	600	800	1000
Азот газообразный [6]	—	—	—	—	0,0078	0,0139	0,0183	0,0257	0,0324	0,0446	0,0554	0,065
Алюминий, $\rho_0 = 0{,}594 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	15 700	23 500	11 700	2400	430	248	237	237	240	230	220	93ж
Аргон газообразный [6]	—	—	—	—	0,006*	0,0096	0,0126	0,0177	0,0222	0,0307	0,0374	0,0436
Барий, $\rho_0 = 0{,}25 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	39	—	—	—	—	21	19	18	—	—	—	—
Бериллий поликристаллический, $\rho_0 = 13{,}5 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	720	1800	3500	4600	1600	450	300	200	160	126	106	91
Бор поликристаллический	38	180	350	430	260	94	55	27	17	10,6	9,6	9,9
Бром жидкий	—	—	—	—	—	—	—	0,12	—	—	—	—
Ванадий, $\rho_0 = 1{,}72 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	5,6	14	26	39	39	32	31	30,7	31,3	33,3	36	36
Висмут:												
поликристаллический	—	—	90	41	20,3	11,8	9,7	7,9	7,0	13	15	17
∥ тригональной оси	—	—	70	31	14,8	8,3	6,7	5,3	4,7	—	—	—
⊥ тригональной оси	1700	290	100	47	23,0	13,6	11,2	9,2	8,2	—	—	—
Водород газообразный [6]	—	—	0,0158	0,0308	0,055	0,101	0,131	0,183	0,226	0,305	0,38	0,45
Дейтерий газообразный [6]	—	—	0,0120	0,0262	0,049	0,081	0,101	0,133	0,163	0,216	0,27	0,32
Вольфрам, $\rho_0 = 1{,}7 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	5600	9700	4100	690	230	192	185	174	159	137	125	118
Гадолиний:												
поликристаллический, $\rho_0 = 3{,}71 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	4,9	12	17	17	15	13	12	10,5	—	—	—	16*2
∥оси c, $\rho_0 = 2{,}62 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	5,9	14	17,5	16	14	12	11,2	10,8	—	14,9*3	16,4*3	17,8*3
⊥ оси c, $\rho_0 = 4{,}43 \times 10^{-6}$ Ом·см	4,4	11	17	18	16	13,3	11,9	10,4	—	12,3*4	14,3*4	16,3*4
Галлий*5:												
∥ оси a, $\rho_0 = 0{,}1 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	9900	1200	270	80	50	44	42	41	34,5ж	46,2ж	—	—
∥ оси b, $\rho_0 = 0{,}034 \times 10^{-9}$ Ом·см	27 000	3300	1700	200	98	92	90	88	—	—	—	—
∥ оси c, $\rho_0 = 0{,}425 \times 10^{-9}$ Ом·см	3100	350	84	33	20	16,7	16,3	15,9	—	—	—	—
Гафний поликристаллический, $\rho_0 = 4{,}23 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	3,5	9,5	18	24	26	25	24	23,0	22,3	21,3	20,8	20,7
Гелий газообразный [6]	0,0083	0,0171	0,0260	0,040	0,064	0,095	0,116	0,152	0,183	0,244	0,301	0,355
Германий	880	1800	1500	800	330	132	97	60	43	27	20	17
Гольмий:												
поликристаллический, $\rho_0 = 2{,}67 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	5,8	12	14	16	15	13.5	15	16	13,5*6	14*6	15*6	16,5*6
∥ оси c, $\rho_0 = 3{,}21 \times 10^{-5}$ Ом·см	—	13	16	18	17	18	20	22	—	—	—	—
⊥ оси c, $\rho_0 = 2{,}82 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	—	12	14	15	14	12	13	14	—	—	—	—
Диспрозий:												
поликристаллический, $\rho_0 = 4{,}93 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	4,4	10	14	14	12	9,0	9,6	11	11	12	14	15

Продолжение табл. 15.1

Элемент	T, K											
	4	10	20	40	80	150	200	300	400	600	800	1000
|| оси c, $\rho_0 = 5{,}77 \times 10^{-6}$ Ом·см	—	8,4	12	12,4	11,7	8,7	10	12	—	—	—	—
⊥ оси c, $\rho_0 = 4{,}59 \times 10^{-6}$ Ом·см	—	11	16	15	12	9,7	9,3	10	—	—	—	—
Европий	2,5*7	—	—	—	—	17	15	14	—	10*8	11,5*8	—
Железо, $\rho_0 = 14{,}3 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	680	1480	1540	620	175	104	94	80	70	55	43	32
Золото, $\rho_0 = 5{,}50 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	2100	3200	1580	520	332	325	323	317	311	298	284	270
Индий поликристаллический, $\rho_0 = 0{,}587 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	5000	590	190	109	99	94	90	82	75	43ж	48ж	—
Иод	—	—	—	—	—	—	—	0,45т	—	0,007г	0,009г	—
Иридий, $\rho_0 = 19{,}1 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	520	1300	1900	750	210	160	153	147	144	138	132	126
Иттербий поликристаллический [29]	—	—	—	—	—	20	21	47	—	—	—	—
То же, ρ (293 K)/$\rho_0 = 4{,}9$ [30]	—	12	13	11	10	—	—	—	—	—	—	—
Иттрий:												
поликристаллический, $\rho_0 = 5{,}54 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	2,7	7,0	13	15,2	15,7	16,4	16,6	17,2	18	21	23	25
|| оси c, $\rho_0 = 2{,}3 \times 10^{-6}$ Ом·см	5,3	13	23	24	24	25	—	—	—	—	—	—
⊥ оси c, $\rho_0 = 8{,}7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	1,9	5,0	9,4	12,1	12,7	13,3	—	—	—	—	—	—
Кадмий:												
поликристаллический, $\rho_0 = 0{,}112 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	30 000	1200	230	130	106	101	99	97	95	88*9	42ж	—
|| оси c, $\rho_0 = 0{,}134 \times 10^{-9}$ Ом·см	26 000	1150	210	113	91	86	85	83	81	75*9	—	—
⊥ оси c, $\rho_0 = 0{,}103 \times 10^{-9}$ Ом·см	31 000	1250	240	140	113	108	106	104	101	94*9	—	—
Калий, $\rho_0 = 2{,}20 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	1900	460	170	115	108	105	104	102	52ж	44ж	37ж	31ж
Кальций, ρ (273K)/$\rho_0 = 70$ [31]	—	—	—	280	190	190	190	180	—	—	—	—
Кислород газообразный [6]	—	—	—	—	0,0074	0,0138	0,0183	0,0267	0,034	0,047	0,058	0,070
Кобальт поликристаллический, $\rho_0 = 90{,}75 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	110	260	440	380	190	140	122	100	85	67	58	52
Кремний	300	2300	5000	3500	1340	410	260	150	99	62	42	31
Криптон газообразный [6]	—	—	—	—	0,0034*10	0,0050	0,0066	0,0096	0,0124	0,0174	0,0218	0,0256
Ксенон газообразный [6]	—	—	—	—	—	—	0,0038	0,0057	0,0074	0,0106	0,0136	0,0163
Лантан поликристаллический, $\rho_0 = 1{,}29 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	8,8	18	17	10	9,4	10,9	11,8	13,5	14,9	18	21	23
Литий, $\rho_0 = 37{,}2 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	260	610	720	340	120	95	90	85	80	48ж	54ж	60ж
Лютеций:												
поликристаллический, $\rho_0 = 1{,}45 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	7,9	20	25	22	20	18	18	16	—	13*11	14,5*11	16*11
|| оси c, $\rho_0 = 0{,}76 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	16	36	41	32	29	26	25	23	—	—	—	—

Продолжение табл. 15.1

Элемент	T, K											
	4	10	20	40	80	150	200	300	400	600	800	1000
⊥ оси c, $\rho_0 = 2{,}65 \times 10^{-6}$ Ом·см	5,3	15	19	18	16	15	15	14	—	—	—	—
Магний поликристаллический, $\rho_0 = 2{,}61 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	3800	5600	2700	720	200	161	159	156	153	149	146	84ж
Марганец, $\rho_0 = 11{,}3 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	0,96	1,6	2,4	3,6	5,3	6,6	7,2	7,8	—	—	12*12	14*12
Медь, $\rho_0 = 0{,}589 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	16 200	24 000	10 800	2170	560	429	413	401	393	379	366	352
Молибден, $\rho_0 = 0{.}167 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	61	150	290	360	210	149	143	138	134	126	118	112
Мышьяк	—	—	—	—	—	—	69	50	41	—	—	—
Натрий, $\rho_0 = 1{,}47 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	4900	2200	610	190	135	140	142	141	87ж	76ж	67ж	58ж
Неодим поликристаллический	—	—	—	—	—	—	17	17	17	18	20	22
То же [32]	1,1	2,1	3,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Неон газообразный [6]	—	—	—	—	0,018	0,030	0,037	0,049	0,060	0,080	0,097	0,112
Никель, $\rho_0 = 11{,}2 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	860	1800	1650	580	210	122	107	91	80	66	68	72
Ниобий, $\rho_0 = 67{,}9 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	140	290	250	95	58	53	53	54	55	58	61	64
Олово:												
поликристаллическое, $\rho_0 = 0{,}132 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	18 000	1900	320	130	92	78	73	67	62	32ж	36 ж	41ж
∥ оси c, $\rho_0 = 0{,}170 \times 10^{-9}$ Ом·см	14 000	1500	250	104	71	60	57	52	48	—	—	—
⊥ оси c, $\rho_0 = 0{,}118 \times 10^{-9}$ Ом·см	20 000	2200	360	150	102	87	82	74	69	—	—	—
Осмий:												
поликристаллический, $\rho_0 = 23{,}4 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	420	1020	1600	640	140	96	91	88	87	87	87	87
∥ оси c, $\rho_0 = 16{,}7 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	590	1400	2200	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⊥ оси c, $\rho_0 = 27{,}8 \times 10^{-9}$ Ом·см	350	870	140	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Палладий, $\rho_0 = 12{,}3 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	760	1150	600	170	81	73	72	72	74	80	87	94
Платина, $\rho_0 = 10{,}6 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	880	1200	500	140	82	74	73	72	72	73	76	79
Плутоний поликристаллический [33]	—	—	—	—	2,9	3,6	4,1	5,2	7,3	11	12	—
Празеодим поликристаллический	—	—	—	—	6,9	9,3	11	13	14	16	18	22
Прометий	—	—	—	—	—	—	—	18	18	19	20	21
Радий [23]	—	—	—	—	—	—	—	19	—	—	—	—
Рений поликристаллический, $\rho_0 = 3{,}66 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	2500	3600	1200	160	63	54	51	48	46	44	44	45
Родий, $\rho_0 = 8{,}40 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	1200	2800	3600	1020	240	158	154	150	146	136	127	121

Продолжение табл. 15.1

Элемент	T, K											
	4	10	20	40	80	150	200	300	400	600	800	1000
Ртуть:												
поликристаллическая	230	46	40	36	33	30	29	8,3ж	9,8ж	12,0ж	12,8ж	11,7ж
∥ тригональной оси	280	58	50	45	40	36	34	—	—	—	—	—
⊥ тригональной оси	200	40	35	32	29	27	26	—	—	—	—	—
Рубидий, $\rho_0 = 38{,}4 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	190	110	69	64	61	59	59	58	32ж	29ж	25ж	22ж
Рутений поликристаллический, $\rho_0 = 15{,}8 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	620	1500	2300	950	190	128	118	117	114	108	102	98
Самарий поликристаллический, $\rho_0 = 6{,}73 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	5,6*13	6,1	6,9	7,5	7,1	9,2	11	13	13	14	16*14	—
Свинец, $\rho_0 = 0{,}682 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	2200	180	59	45	41	38	37	35	34	31	19ж	22ж
Селен:												
∥ оси c	140	140	59	26	13	7,6	6,1	4,5	5,4	—	—	—
⊥ оси c	27	36	17	7,4	3,6	2,2	1,7	1,3	1,5	—	—	—
аморфный	0,032	0,042	0,056	0,079	0,13	0,20	0,26	0,53	—	—	—	—
Сера:												
поликристаллическая	10,6	8,2	2,4	1,1	0,65	0,43	0,36	0,27	0,13ж	0,17ж	—	—
аморфная	—	—	—	—	0,16*1	0,175	0,185	0,206	—	—	—	—
Серебро, $\rho_0 = 0{,}621 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	14 700	16 800	5100	1050	470	432	430	429	425	412	396	379
Скандий поликристаллический, $\rho_0 = 10{,}6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	2,8	6,8	12	14	14	15	15,5*15	16*15	16,2*15	16,7*15	17,2*15	17,7*15
Стронций	—	—	—	—	—	45	41	35	32	28	28	26
Сурьма поликристаллическая	190	480	240	110	55	36	30	24	21	18	17	27ж
Таллий поликристаллический, $\rho_0 = 0{,}240 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	1800	190	81	65	58	52	49	46	44	—	—	—
Тантал, $\rho_0 = 0{,}214 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	46	107	140	87	60	58	58	58	58	59	59	60
Теллур:												
∥ оси c	670	310	95	32	12,2	5,9	4,6	3,4	2,8	2,3	4,2ж	6,5ж
⊥ оси c	250	130	41	15	6,2	3,3	2,6	2,0	1,7	1,4	—	—
Тербий:												
поликристаллический, $\rho_0 = 2{,}19 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	8,4	19	23	19	15	12	10	11	—	14,7*16	15,3*16	16,7*16
∥ оси c, $\rho_0 = 1{,}87 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	18*13	26	29	23	19	15	13	15	—	15*17	16,4*17	18*17
⊥ оси c, $\rho_0 = 2{,}37 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	11*13	16	20	17	14	11	9,0	9,6	—	13*17	14,9*17	17*17
Технеций поликристаллический [27]	—	—	—	—	—	—	—	55	53	49	51	55
Титан поликристаллический, $\rho_0 = 1{,}90 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	5,8	14	28	39	33	27	25	22	20	19	20	21

Продолжение табл. 15.1

Элемент	T, K											
	4	10	20	40	80	150	200	300	400	600	800	1000
Торий, $\rho_0 = 26{,}8 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	360	470	170	84	63	56	55	54	55	56	57	58
Туллий:												
поликристаллический, $\rho_0 = 1{,}8 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	82	23	18	11	13	15	16	17	—	15*18	16*18	18*18
∥ оси c, $\rho_0 = 3{,}5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	14*13	21	14	10,5	19	22	23,5	24	—	—	—	—
⊥ оси c, $\rho_0 = 1{,}7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	14*13	24	20	11	10,5	12,6	13,4	14,1	—	—	—	—
Углерод:												
аморфный	0,016	0,071	0,16	0,31	0,56	0,94	1,2	1,6	1,9	2,2	2,4	2,5
алмаз типа I	11	140	790	2900	3500	2000	1400	900	650	—	—	—
алмаз типа IIa	26	320	1700	6600	11 700	6000	4000	2300	1500	—	—	—
алмаз типа IIв	16	200	1100	4400	6600	3300	2300	1350	930	—	—	—
графит пиролитический:												
∥ оси c	—	1,2	4,0	12	18	13	9,2	5,7	4,1	2,7	2,0	1,6
⊥ оси c	10	81	420	1600	4300	4500	3200	2000	1400	890	670	530
Ураи поликристаллический, $\rho_0 = 2{,}14 \cdot 10^{-6}$ Ом·см	4,4	9,8	16	18	21	24	25	28	30	34	39	44
Фосфор:												
черный поликристаллический	0,51	6,5	27	44	35	23	18	12	—	—	—	—
белый аморфный	—	—	—	—	—	—	0,31	0,24	0,18ж	0,16ж	—	—
Фтор газообразный [6]	—	—	—	—	—	0,0134	0,0182	0,027	0,035	0,049	—	—
Хлор газообразный [6]	—	—	—	—	—	—	0,0054	0,0088	0,0124	0,0188	—	—
Хром поликристаллический, $\rho_0 = 60{,}8 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	160	390	590	430	180	129	111	94	91	81	71	65
Цезий, $\rho_0 = 41{,}8 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	110	69	55	47	41	38	37	36	20ж	21ж	19ж	17ж
Церий, $\rho(293\,\text{K})/\rho(20\,\text{K}) = 1{,}93$	0,48	1,1	1,9	3,2	5,2	7,7	9,0	11	13	17	19	22
Цинк поликристаллический, $\rho_0 = 1{,}28 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	7100	4700	1000	280	130	117	118	116	111	103	56ж	67ж
Цирконий поликристаллический, $\rho_0 = 218 \cdot 10^{-9}$ Ом·см	44	100	110	59	37	28	25	23	22	21	22	24
Эрбий:												
поликристаллический	3,6	7,1	7,8	9,3	11	13,7	14,6	14,3	14	14	15	16
∥ оси c	—	7,2	6,4	8,6	12	17,4	18,5	18,4	—	—	—	—
⊥ оси c	—	7,0	8,6	9,6	10	12	12,6	12,6	—	—	—	—

Примечание. Знак ∥ (⊥) означает, что приведенное значение теплопроводности относится к направлению, параллельному (перпендикулярному) указанной оси.

*1 $T = 90$ K.
*2 ρ (300 K) $= 130 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [26].
*3 ρ (300 K) $= 127 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [27].
*4 ρ (300 K) $= 136 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [27].
*5 Значения λ для поликристаллического галлия близки к значениям λ для монокристалла в направлении оси a.
*6 ρ (300 K) $= 90 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [27[.
*7 Данные из [28].
*8 ρ (300 K) $= 86 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [27].
*9 $T = 294{,}258$ K — точка плавления.
*10 $T = 100$ K.
*11 ρ (300 K) $= 65 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [27].
*12 ρ (300 K) $= 165 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [26].
*13 $T = 6$ K.
*14 Данные из [34].
*15 ρ (300 K) $= 52 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [27].
*16 ρ (300 K) $= 129 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [26].
*17 $\rho_{\parallel c}$ (300 K) $= 98 \cdot 10^{-6}$ Ом·см, $\rho_{\perp c}$ (300 K) $= 127 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [27].
*18 ρ (300 K) $= 78 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [27].

Сокращения: г — газовая фаза, ж — жидкая фаза; т — твердая фаза.

Таблица 15.2. Теплопроводности неорганических газов при атмосферном давлении [6, 14]

T, К	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)
Азота закись N_2O	
200	9,75
250	13,4
300	17,3
400	25,3
600	41,1
700	48,1
Азота оксид NO	
120	10,2
200	17,6
300	25,9
400	33,6
600	47,8
800	62,7
900	71,2
Аммиак NH_3	
200	13,3
300	24,4
400	37,4
600	66,8
800	98,5
Водяной пар H_2O	
373	25,1
473	33,3
573	43,4
673	54,8
773	67,0
873	79,9
973	93,4
1073	107
Водяной пар D_2O	
373	24,8
473	33,9
573	44,2
673	56,1
773	69,7
823	76,9
Воздух	
80	7,5
100	9,3
150	13,8
200	18,0
300	26,2
400	33,8
600	46,9
800	57,3
1000	66,7
1200	76,3
Сера шестифтористая SF_6	
200	4,53
300	13,2
400	20,3
600	32,7
800	43,2
1000	54,0
Сероводород H_2S	
180	3,36
200	6,08
250	11,2
300	14,8
400	20,3
600	34,4
Серы диоксид SO_2	
270	8,19
300	9,70
400	14,8
600	25,3
800	35,7
1000	45,7
1200	54,8
1370	61,6
Углерода диоксид CO_2	
200	9,38
300	16,6
400	24,3
600	40,7
800	55,1
1000	68,2
1200	80,3
1400	92,1
Углерода оксид CO	
80	6,91
100	8,71
150	13,2
200	17,4
300	24,9
400	31,9
600	45,0
800	57,0
1000	68,3
1200	79,2
1400	90,0
1500	95,4

Таблица 15.3. Теплопроводности органических газов при атмосферном давлении [6]

T, К	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)
Ацетон CH_3COCH_3	
300	11,2
350	15,7
400	20,4
450	25,3
480	28,3
Бензол C_6H_6	
320	11,9
350	14,7
400	19,7
450	24,8
500	30,2
600	41,0
660	47,8
н-Бутан C_4H_{10}	
280	13,8
300	16,1
350	22,1
400	28,4
450	35,2
500	42,4
570	53,3
н-Гексан C_6H_{14}	
360	19,1
400	23,6
450	29,5
500	36,0
600	50,0
630	54,5
н-Гептан C_7H_{16}	
380	19,6
400	21,7
450	27,4
500	33,5
600	46,6
630	51,0
п-Ксилол C_8H_{10}	
450	24,0
500	29,7
600	41,2
700	52,7
Метан CH_4	
120	12,8
150	16,2
200	21,8
300	34,2
400	49,3
500	68,0
600	88,8
700	109
750	118
н-Октан C_8H_{18}	
420	22,2
450	25,4
500	31,1
600	43,7
н-Пентан C_5H_{12}	
320	16,6
350	20,0
400	26,0
450	32,5
470	35,2
Пропан C_3H_8	
260	13,5
300	18,2
400	31,1
500	45,9
600	62,6
700	81,3
800	101
Пропилен C_3H_6	
230	10,9
250	12,5
300	17,6
350	23,5
400	30,0
450	36,7
500	43,5
600	57,9
Спирт н-амиловый $C_5H_{11}OH$	
420	23,6
450	26,7
500	32,6
600	47,2
Спирт изопропиловый C_3H_7OH	
400	25,4
450	31,0
500	37,3
560	45,4
Спирт метиловый CH_3OH	
380	23,8
400	26,1
450	31,6
500	37,5
570	46,8
Спирт этиловый C_2H_5OH	
400	25,8
450	31,6
500	37,8
570	47,2

Продолжение табл. 15.3

T, K	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)
Толуол C_7H_8	
380	16,5
400	18,7
450	24,5
500	30,2
600	41,7
700	53,6
Углерод четыреххфтористый CF_4	
200	8,98
250	12,6
300	16,5
350	20,4
400	24,2
450	27,8
500	31,2
600	37,5
700	43,5
Углерод четыреххлористый CCl_4	
300	6,71
350	8,34
400	9,95
450	11,6
500	13,2
600	16,4
Фреон-11 $CFCl_3$	
300	8,7
350	10,7
400	12,7
450	14,7
500	16,4
Фреон-12 CF_2Cl_2	
250	8,0
300	10,2
350	12,4
400	15,0
450	17,5
Фреон-13 CF_3Cl	
250	9,4
300	12,5
350	15,6
400	18,6
450	21,7
Фреон-21 $CHFCl_2$	
300	9,0
350	11,5
400	14,0
450	16,4
Фреон-22 CHF_2Cl	
250	8,0
300	10,6
350	14,2
400	16,6
Циклогексан C_6H_{12}	
380	19,2
400	21,7
450	28,0
500	35,0
600	51,0
630	56,4
Этан C_2H_6	
200	11,4
250	15,6
300	21,4
350	28,5
400	36,1
450	44,3
500	53,0
600	71,5
700	90,7
Этил хлористый C_2H_5Cl	
260	8,85
300	11,6
350	15,3
400	19,4
450	23,8
500	28,6
540	32,7
Этилен C_2H_4	
180	9,7
200	11,0
250	15,2
300	20,6
350	27,0
400	34,2
450	42,4
500	51,0
600	66,2
Этилформиат $HCOOC_2H_5$	
350	16,9
400	22,7
450	29,0
500	36,8
600	58,0
Эфир диэтиловый $(C_2H_5)_2O$	
350	19,9
400	25,9
450	31,5
500	36,7

Таблица 15.4. Теплопроводности газов при различных температурах и давлениях [6, 14]

Газ	T, K	λ, 10^{-3} Вт/(м·К) при p, 10^5 Па				
		1	100	300	500	1000
Азот N_2	100	9,58	108	129	145	—
	150	13,9	—	83,6	101	—
	200	18,3	29,4	58,9	78,1	—
	300	25,7	30,8	44,6	57,9	84,6
	400	32,4	35,6	44,5	53,8	74,1
	600	44,6	46,3	51,8	57,1	70,3
	800	55,4	56,7	60,6	64,5	74,4
	1000	65,4	66,6	70,0	72,9	80,2
	1400	84,4	85,2	86,8	88,7	94,7
Аммиак NH_3	200	13,2	658	662	—	—
	300	24,4	479	501	—	—
	400	37,4	123	321	—	—
	600	66,8	76,9	108	—	—
Аргон Ar	100	6,6	118	131	—	—
	150	9,6	61,5	84,3	98,6	—
	200	12,6	23,5	55,0	70,9	—
	300	17,7	22,5	34,8	47,0	69,6
	400	22,2	25,4	33,0	41,5	59,2
	600	30,7	32,9	36,7	41,4	52,8
	800	37,4	39,0	42,0	45,3	53,7
	1000	43.6	44,9	47,2	49,7	56.2
Водород нормальный n-H_2	20	100*[1]	124	—	—	—
	50	37,2	110	177	231	—
	100	67,7	93,1	142	179	—
	150	101	117	148	176	—
	200	131	143	165	186	—
	300	183	191	205	219	—
	400	225	231	242	252	—
	500	266	271	280	288	—
Водяной пар H_2O	273,15	561*[1]	566*[1]	577	588	612
	373,15	25,1	684*[1]	695	706	732
	473,15	33,3	671*[1]	688	704	741
	573,15	43,4	551*[1]	589	619	675
	673,15	54,8	67,9	331	451	548
	773,15	67,0	75,6	114	203	395
	873,15	79,9	87,1	112	152	272
	973,15	93,4	100	121	151	236
	1073,15	107	113	131	156	225
Воздух	100	9,3	124	143	158	—
	150	13,8	53,6	92,3	113	—
	200	18,0	29,4	61,9	82,8	—
	300	26,2	31,4	45,6	59,0	87,9
	400	33,8	37,3	46,4	55,4	76,9
	600	46,9	49,0	54,3	59,8	72,9
	800	57,3	58,8	62,4	66,4	75,9
Гелий He	20	26,0	60,0	99,0	136	—
	50	46,6	64,1	95,6	121	—
	100	73,3	86,3	110	130	—
	150	95,1	104	118	137	—
	200	116	123	135	147	—
	300	152	157	165	173	194
	400	183	186	193	199	216
	600	244	246	251	255	266
	800	301	303	306	309	318
	1000	355	356	359	362	369
	1500	475	476	478	480	485

Продолжение табл. 15.4

Газ	T, К	λ, 10^{-3} Вт/(м·К) при p, 10^5 Па				
		1	100	300	500	1000
Кислород O_2	100	9,25	142	153	161	—
	150	13,8	81,2	105	117	—
	200	18,3	33,4	71,3	89,5	—
	300	26,7	32,7	50,1	63,1	—
	400	34,1	39,1	49,2	59,5	—
	600	46,8	48,7	55,6	62,0	—
	800	58,3	60,7	65,7	69,5	—
	1000	69,5	70,3	73,5	77,7	—
	1400	91,3	91.8	93,8	95,9	—
Метан CH_4	100	212*[1]	222	237	249	—
	150	61,2	150	173	194	—
	200	21,8	—	126	144	—
	300	34,2	44,7	74,0	96,0	136
	400	49,3	55,8	72,3	88,0	118
	600	88,8	92,6	102	110	131
	750	118	121	127	135	151
Углерода диоксид CO_2	300	16,6	87,4	118	137	171
	400	24,3	30,9	60,9	83,3	119,5
	600	40,7	43,7	53,2	64,1	87,3
	800	55,1	57,3	63,2	69,8	85,6
	1000	68,2	69,8	74,1	78,8	90,6
Фреон-14 CF_4	200	8,98	62,2	74,8	87,6	—
	300	16,5	29,0	51,0	62,0	—
	400	24,2	30,9	48,5	59,9	—
Этан C_2H_6	200	11,4	171	186	198	—
	300	21,4	—	111	130	—
	400	36,1	48,3	81,8	102	135
	600	71,5	75,3	87,7	99,7	124
Этилен C_2H_4	150	211*[1]	222	233	244	—
	200	11,0	166	188	205	—
	300	20,6	69,1	107	129	—
	400	34,2	45,0	77,1	97,3	—

*[1] Жидкость при давлении ниже критического.

Таблица 15.5. **Теплопроводности жидкостей на линии насыщения** [6, 14]

T, К	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)	T, К	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)
Азот N_2		*Аргон* Ar	
65	160	85	126
70	151	90	120
80	132	100	108
90	114	110	96,3
100	96,6	120	84,2
110	79,5	130	71,8
120	62,8	140	59,2
125	52,0	150	40,4
Аммиак NH_3		*Ацетон* CH_3COCH_3	
200	657	200	197
250	562	250	178
300	467	300	159,5
350	360	350	140,5
400	230	400	122
		450	103
		500	84

Продолжение табл. 15.5

T, К	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)	T, К	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)
Бензол C_6H_6		*Кислород* O_2	
290	148	90	148
300	143	100	135
350	128,5	110	122
400	113,5	120	109
450	99	130	95,1
		140	82,0
		150	65,3
Вода H_2O		*Спирт метиловый* CH_3OH	
273,15	561	180	243
323,15	644	200	236
373,15	679	250	218
423,15	682	300	202
473,15	663	350	188
523,15	622	400	176
573,15	548	450	167
623,15	445	480	162
643,15	424		
Вода тяжелая D_2O		*Спирт н-пропиловый* C_3H_7OH	
277,15	568	150	182,5
323,15	620	200	176
373,15	640	250	166
423,15	631	300	154
473,15	596	350	144
523,15	541	400	136
573,15	478	450	128
623,15	378	480	124
н-Водород H_2		*Спирт этиловый* C_2H_5OH	
16	85,0	160	207
18	95,0	180	202
20	100	200	196
22	103	250	180
24	104	300	166
26	102	350	153
28	97,6	400	143
30	92,8	420	140
32	83.7		
Гелий I He I		*м-Терфенил* $C_{18}H_{14}$	
2,5	19,1	350	136,5
3,0	20,3	400	133
3,5	23,2	450	130
4,0	28,1	480	128
4,5	34 8		
5,0	43,4		
Глицерин $C_3H_8O_3$		*Толуол* C_7H_8*[1]	
280	282	180	159,5
300	288	200	157
400	300	250	145
500	315	300	132,5
Дифенил $C_{12}H_{10}$		350	120
350	137	400	108
400	130	450	97
450	123	500	85,5
500	116	550	76,5
550	109	570	73,5
580	105		

Продолжение табл. 15.5

T, К	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)	T, К	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)
Углерод четыреххлористый CCl_4[*1]		*Фреон-21* $CHFCl_2$	
250	113,7	203	134
300	102,7	223	127
350	91,5	273	109
400	80,4	323	92,0
450	69,5	373	75,5
470	65,1		
Углерода диоксид CO_2		*Фреон-22* CHF_2Cl	
220	181	123	163
250	140	173	143
270	113	223	119
290	90.0	273	96,5
295	86,0	323	75,2
300	85,0	353	62,6
Фреон-11 $CFCl_3$		*Этиленгликоль* $(CH_2OH)_2$	
173	120	280	250
223	108	300	254
273	96,1	350	260,5
323	83,9	400	260
373	72,0	450	254,5
413	63,0		
Фреон-12 CF_2Cl_2			
123	129		
173	112		
223	93,1		
273	76,0		
323	62,0		
353	53,7		

[*1] Рекомендованы в [6] в качестве образцовых веществ.

Таблица 15.6. Теплопроводности масел и некоторых продуктов перегонки нефти [13, 15]

Вещество	t, °С	λ, Вт/(м·К)[*1]
Бензин Б-70 (жидкий)	—50···50···200	0,13···0,11···0,080
Вазелин	25	0,18
Газолин	30	0,14
Керосин Т-1 (жидкий)	—50···50···300	0,13···0,11···0,074
Масло:		
касторовое	20	0,18
оливковое	20	0,17
парафиновое	30	0,12
трансформаторное (ГОСТ 982-80)	—50···50···100	0,12···0,11···0,10
АМГ-10	20···100	0,12···0,11
ВМ-4	—30···100	0,13···0,12
МС-20	0···150	0,14···0,12
ТМ-1	—50···100	0,125···0,11
ХФ-22	—50···100	0,17···0,14
Парафин	30	0,12
Топливо дизельное	20···100	0,12···0,11

[*1] Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.7. Теплопроводности сталей [22, 23]

Марка стали (массовый состав) [*1]	T, К	λ[*2], Вт/(м·К)
Железо Армко зарубежного производства, хорошо отожженное, $\rho_0 = 0{,}69 \cdot 10^{-6}$ Ом·см [4]	10···20···40···80···150··· ···300···600···1000	36,2···71,2···113···105··· ···85,5···72,7···53,1···32,3
Железо Армко [*3], ρ (296 К)=14,5 · 10^{-6} Ом·см [35]	300···600···1000···1183···1673	71···52···32···32···38
Ст. 0,8[*4] (0,065С; 0,4 Mn)	300···600···900	88···58···33
Ст. 10[*4] (0,1 С; 0,4 Mn; 0,17—0,37 Si)	300···600···800	83···57···44
Ст. 15[*4] (0,15 С; 0,35—0,65 Mn; 0,17—0,37 Si)	300···600···900	86···54···32
Ст. 20[*4] (0,15 — 0,25 С; 0,35 — 0,65 Mn; 0,17 — 0,37 Si)	300···600···800···900	86···54···38···31
Ст. 35[*4] (0,32 — 0,4 С; 0,5 — 0,8 Mn; 0,17 — 0,37 Si)	300···600···800	85···50···36

Марка стали (массовый состав) *1	*T*, *K*	λ*2, Вт/(м·к)
Ст. 45*4 (0,4 — 0,5 C; 0,5—0,8 Mn; 0,17—0,37 Si)	300···600···800	79···43···30
Ст. 65Г (0,62 — 0,7 C; 0,9—1,2 Mn; 0,17—0,37 Si)	300···600···1000	45···28···24
15Х (0,12 — 0,18 C; 0,4—0,7 Mn; 0,17—0,37 Si; 0,7 — 1 Cr) 15ХА (0,12 — 0,17 C; 0,4 — 0,7 Mn; 0,17 — — 0,37 Si; 0,7 — 1 Cr) 20Х (0,17 — 0,23 C; 0,5 — 0,8 Mn; 0,17 — 0,37 Si; 0,7— Cr)	300···600···800···1200	39···35···33···30
30Х*4 (0,24 — 0,32 C; 0,5 — 0,8 Mn; 0,17 — — 0,37Si; 0,8 — 1,1 Cr) 35Х*4 (0,31 — 0,39 C; 0,5 — 0,8 Mn; 0,17 — — 0,37 Si; 0,8 — 1,1 Cr)	300···600···900	48···38···28
40Г*4 (0,37 — 0,45 C; 0,7 — 1 Mn; 0,17 — 0,37 Si)	300···500···700	65···51···46
35Г2*4 (0,31—0,39 C; 1,4 — 1,8 Mn; 0,17 — 0,37 Si)	400···700	38···36
50Г2*4 (0,46 — 0,55 C; 1,4 — 1,8 Mn; 0,17 — —0,37 Si)	300···600···800	43···36···35
40ХС*4 (0,37 — 0,45 C; 0,3 — 0,6 Mn; 1,2 — — 1,6 Si; 1,3 — 1,6 Cr)	300···600···900	47···35···34
15ХМ (0,11 — 0,18 C; 0,4—0,7 Mn; 0,17 — 0,37 Si; 0,8 — 1,1 Cr; 0,4 — 0,55 Mo) 15ХМА (0,26 — 0,33 C; 0,4 — 0,7 Mn; 0,17 — 0,37 Si; 0,8 — 1,1 Cr; 0,15—0,25 Mo)	300···600···800···1200	42···39···37···31
30ХМ (0,26 — 0,34 C; 0,4—0,7 Mn; 0,17—0,37 Si; 0,8 — 1,1 Cr; 0,15 — 0,25 Mo) 30ХМА (0,26 — 0,33 C; 0,4 — 0,7 Mn; 0,17 — — 0,37 Si; 0,8 — 1,1 Cr; 0,15 — 0,25 Mo) 30ХГС (0,28 — 0,35 C; 0,8 — 1,1 Mn; 0,9 — 1,2 Si; 0,8 — 1,1 Cr) 30ХГСА (0,28 — 0,34 C; 0,8 — 1,1 Mn; 0,9 — 1,2 Si; 0,8 — 1,1 Cr)	300···600···800···1200	39···38···37···35
15Л — 55Л*5 (0,15 — 0,55 C в зависимости от марки: 0,3 — 0,9 Mn; 0,2 — 0,4 Si; 0,45 — 0,6 S; 0,04 — 0,08 P)	300···600···800···1200	46···41···38···33
У8*6 (1,15 — 1,24 C; 0,15 — 0,35 Mn; 0,15 — 0,3 Si)	300···1200	50···26
У12 (1,15 — 1,24 C; 0,15 — 0,35 Mn; ⩽0,2 Cr; 0,15 — 0,35 Si) [36, с. 197 — 198]	300···600···900···1200	45···37···32···25
Р18 (0,7 — 0,8 C; 3,8 — 4,4 Cr; 17,5 — 18,5 W; 1 — 1.4 V; ⩽ 1 Mo)	300···600···900···1200	22···26···26···24
Р12 (0,8 — 0,9 C; 3,1 — 3,6 Cr; 12 — 13 W; 1,5 — 1,9 V; ⩽ 1 Mo) [37]	300···500···700	16···19···26
12Х13*6 (0,09 — 0,15 C; 12 — 14 Cr; ⩽ 0,8 Si; ⩽ 0,8 Mn)	200···300···600···900···1400	31···31···33···34···33

Марка стали (массовый состав)*1	T, К	λ*2, Вт/(м·К)
07Х21Г7АН5*6 (⩽ 0,07 C; 6—7,5 Mn; 19,5—21 Cr; 5 — 6 Ni; 0,15 — 0,25 N) [24]	10···20···40···80···300	1,7···3,5···5,9···10,2···17
15Х12В2МФ*6 (0,1 — 0,17C; 0,5 — 0,8 Mn; 11 — 13 Cr; 1,7 — 2,2 W; 0,6 — 0,9 Mo; 0,15 — 0,3 V)	200···300···900···1400	30···31···33···32
18Х12ВМБФР (0,15 — 0,22 C; 0,4 — 0,6 Mo; 0,5 Si; 11 — 13 Cr; 0,4 — 0,7W; 0,15 — 0,3V; 0,2 — 0,4 Nb)	200···300···600···900···1400	33···33···34···32···30
12Х18Н9Т*6 (⩽0,12 C; 1 — 2 Mn; 17 — 19 Cr; ⩽ 0,8 Si; 8 — 9,5 Ni; 5 · C — 0,8 Ti)	200···300···600···900···1400	13,5···14,5···19···23···28
12Х18Н10Т*6 (⩽ 0,12 C; ⩽ 2 Mn; ⩽ 0,8 Si; 17 — 19 Cr; 9 — 11 Ni; 5·C — 0,8 Ti) [24, 38]	10···20···40···80···150···300	1,5···3,7···5,5···8,2··· ···11,0···15,1
12Х18Н10Т*7 (состав тот же) [39]	300···600···900···1100	15,0···19,8···26,6···27,8
20Х23Н18 (⩽0,1 C; ⩽2 Mn; ⩽1 Si; 22 — 25 Cr; 17 — 20 Ni)	200···300···600···1400	13,5···14···15···18
08Х16Н13М2Б (0,06 — 0,12 C; 15 — 17 Cr; 12,5 — 14,5 Ni; 2 — 2,5Mo; 0,9 — 1,3 Nb)	200···300···600···1000···1400	14···15···16···17···18
08Х18Н12Б (⩽0,08 C; 0,8 Si; 1—2 Mn; 17—19 Cr; 11 — 13 Ni; 8 C — 1,2 Nb)	200···300···600···1000···1200	14···15···19···23···26
10Х18Н9ТЛ (⩽0,14 C; ⩽ 1 Si; 1 — 2 Mn; 17 — 20 Cr; 8 — 11 Ni; (C — 0,03)·5 — 0,8 Ti)	200···300···600···1000···1400	13···14···18···25···28
ХН35ВТ (⩽0,12 C; 1 — 2 Mn; 14 — 16 Cr; 34 — 38 Ni; 2,8 — 3,5 W; 1,1 — 1,5 Ti) ХН35ВТР (⩽0,1 C; ⩽1Mn; 14,4 — 16 Cr; 35 — 38 Ni; 2,8 — 3,5 W; 1,1 — 1,5 Ti)	200···300···600···1000···1400	13···14···15···17···19
Э11 — Э13, Э1100 — Э1300 [40]	300	29
Э41 — Э43А [40]	300	12
Э310 — Э330 [40]	300	15
Э45 — Э46 [40]	300	13
Чугун:		
серый средней прочности	300	42—50
легированный	400	29—58
	700	25—54

*1 Цифры после букв в названии стали, как правило, указывают на округленное массовое содержание компонента в процентах (при содержании менее 1% цифру не пишут).

*2 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

*3 Массовый состав, %: 99,5 Fe; 0,035 C: 0,12 S; 0,14 Mn; 0,025 S: 0,005 P; 0,20 Cu.

*4 Сталь литая отожженная.

*5 Сталь отожженная.

*6 Сталь закаленная.

*7 Эта сталь (ГОСТ 5632-72) рекомендована для образцовых мер теплопроводности (ГОСТ 8.140-82).

Таблица 15.8. **Теплопроводности сплавов меди [22, 24]**

Сплав (массовый состав, %)	T, К	λ*1, Вт/(м·К)
Бронза:		
БрА5 (4—6 Al)	300···600···900	105···130···150
БрАЖМЦ10-3-1,5 (9—11 Al; 3—4 Fe; 1—2 Mn)	300···600···800	59···77···84
БрБ2, отожженная в течение 2 ч при $T = 573$ К, мягкая (1,8 — 2,1 Be)	4···10···20···40···80	2,3···5,0···11···21···37
БрКд 1(0,9—1,2 Cd)	293	340
БрКМц3-1 (1—1,5 Mn; 2,75—3,5 Si)	300···500···700	42···55···54
БрМц5 (4,5—5,5 Mn)	300···500···700	94···110···130
БрОФ10-1 (9—11 Sn; 0,4—1,1 P)	300···900	34···52
БрОЦ4-3 (3,5—4 Sn; 2,7—3,3 Zn)	300···600···900	84···110···120
бериллиевая состаренная (3,0 Be; ⩽0,1Fe)	20···80···150···300	18···65···110···170
фосфористая отожженная (18.07 Sn; 1,86 Zn; 0,16 Pb; 0,013 P)	20···80···150···300	6,0···20···77···190
Константан*2:		
МНМц40-1,5 (39—41 Ni; 1—2 Mn)	273···473···573···673	21···26···31···37
зарубежного производства (55 Cu; 45 Ni)	4···10···20···40···80···300	0,8···3,5···8,8···13···18···23
Копель МНМц43-0,5*2 (42,5—44 Ni; 0,1—0,5 Mn) [41]	473···1273	25···58
Латунь:		
Л62 (Zn; 60,5—63,5 Cu)	300···600···900	110···150···200
Л68 деформированная (Zn; 67—70 Cu)	80···150···300	71···84···110
то же	300···900	110···120
Л80 полутомпак (Zn; 79—81 Cu)	300···600···900	110···120···140
ЛАН59-3-2 (Zn; 57—60 Cu; 2,5—3,5 Al; 2—3 Ni)	300···600···900	84···120···150
ЛМц58-2 (Zn; 57—60 Cu; 1—2 Mn)	300···600···900	70···100···120
Л070-1 (Zn; 69—71 Cu; 1—1,5 Sn)	300···600	92···140
ЛС59-1 отожженная (Zn; 57—60 Cu; 0,8—1,9 Pb)	4···10···20···40···80···300	3,4···10···19···34···54···120
ЛС59-1В(Zn; 57—61 Cu; 0,8—1,9 Pb)	300···600···900	110···140···180
Манганин:		
МНМц3-12 (2,5—3,5 Ni; 11,5—13,5 Mn)	273···573	22···36
зарубежного производства [42, с. 320]	4···10···40···80···150···300	0,5···2···7···13···16···22
Мельхиор МНЖМц30-0,8-1 (29—33 Ni; 0,5—1 Fe; 0,8—1,3 Mn)	300	29—37
Томпак:		
Л90 прокатный (Zn; 88—91 Cu)	300···900	110···200
Л96 волоченный (Zn; 95—97 Cu)	300···800	240···260

*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.
*2 Сплав термоэлектродный.

Таблица 15.9. **Теплопроводности сплавов никеля** [22, 24, 40]

Сплав (массовый состав, %)	T, К	λ*1, Вт/(м·К)
Алюмель НМцАК2-2-1*2 (1,6—2,4 Al; 1,8—2,7 Mn; 0,85—1,5 Si; 0,6—1,2 Co) [41]	293···1073	27···44
Инвар (35 Ni; 65Fe)	273···573	11···13
Монель НМЖМц28-2,5-1,5 (27—29 Cu; 2—3 Fe; 1,2—1,8 Mn)	273···673	22···34
Нихром Х20Н80Т (20—23 Cr; 0,4—1,5 Si)	273···873	12···23
Ферронихром Х15Н60 (15—18 Cr; 20—25 Fe; 0,4—1,5 Si)	273···673	12···18
Хромель НХ9,5*2 (9,0—10 Cr; 0,6—1,2 Co) [41]	293···1073	18···34
НМц2,5 (2,3—3,3 Мн)	293	53
МНц5 (4,6—5,4 Mn)	293	48
44НХТЮ (Fe: 0,4—0,8 Al; 5,2—5,8 Cr; 43,5—45,5 Ni; 2,2—2,7 Ti)	293	16
41НХТА (Fe; 0,5—1,0 Al; 4,9—5,7 Cr; 41,5—43,5 Ni; 2,2—3,0 Ti)	293	16
19НХ (Fe; 10—12 Cr; 0,3—0,6 Mn; 18—20 Ni; 0,2—0,4 Si)	293	16
65НП (Fe; 64,5—66 Ni)	293	29
79НМ (Fe; 76,5—80 Ni: 0,3—0.5 Si; 3,8—4,1 Mo; 0,6—1,1 Mn)	293	13

*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.
*2 Сплав термоэлектродный.

Таблица 15.10. **Теплопроводности сплавов алюминия** [24, 43]

Сплав (массовый состав, %)	T, К	λ*1, Вт/(м·К)
АД1 нагартованный (примесь <0,7)	4···10···20···40···80···150···300	50···130···260···400···250···220···210
АВ (0,45—0,9 Mg; 0,5—1,2 Si; 0,1—0,5 Cu; (0,15—0,35 Mn)	300···573	180···190
АД31 закаленный, искусственно состаренный (0,1 Fe; 0,65 Mg; 0,1 Mn; 0,38 Si)	4···10···20···40···80···200	35···87···170···270···230···200
То же	300—673	190
АД33 (0,8—1,2 Mg; 0,4—0,8 Si; 0,15—0,4 Cu; 0,15—0,35 Cr)	300···573	140···170
АК4 (1,9—2,5 Cu; 1,4—1,8 Mg; 1—1,5 Ni; 1,1—1,6 Fe; 0,5—1,2 Si) [22]	300···500···600···700	145···160···170···170
АК8 закаленный, искусственно состаренный (3,9—4,8 Cu; 0,4—0,8 Mg; 0,4—1 Mn; 0,6—1,2 Si)	20···40···80···150···300	50···72···100···125···160
То же	300···573···673	160···180···180
АЛ1 (3,75—4,5 Cu; 1,75—2,25 Ni; 1,25—1,75 Mg) [22]	300···400···600	130···140···150
АЛ4 (8—10,5 Si; 0,6—1,2 Fe; 0,25—0,5 Mn; 0,17—0,3 Mg)	300···473···673	150···160···155
АЛ5 (4,5—5,5 Si; 1—1,5 Cu; 0,35—0,6 Mg)	300···473···573	160···170···180
АЛ8 (9,5—11,5 Mg)	300···473···673	92···100···110
АМг2, отожженный в вакууме в течение 1 ч при $T = 623$ К (1,8—2,8 Mg; 0,2—0,6 Mn)	4···10···20···40···80···150···300	4,6···12···25···49···77···100···130
АМг5 отожженный (4,8—5,8 Mg; 0,5—0,8 Mn: 0,02—0,1 Ti)	10···20···40···80···150···300	10···20···40···66···92···130
То же	300···473···673	120···130···150
АМц нагартованный (1—1,6 Mn; 0,7 Fe; 0,6 Si; 0,2 Ti; 0.1 Zn; 0.05 Mg)	4···10···20···40···80···150···300	11···28···58···110···140···150···170
То же	300···473···673	180···180···190
В93 (6,3—7,3 Zn; 1,6—2,2 Mg; 0,8—1,2 Cu; 0,2—0,45 Fe)	300···473···673	160···170···160

*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Сплав (массовый состав, %)	T, К	λ^{*1}, Вт/(м·К)
В95 (5—7 Zn; 1,8—2,8 Mg; 1,4—2 Cu; 0,2—0,6 Mn; 0,1—0,25 Cr)	300···473···673	155···160···160
ВАЛ1 (5,5—6,2 Cu; 0,8—1,2 Ni; 0,6—1 Mn; 0,15—0,3 Cr; 0,05—0,2 Zn)	300···473···673	130···150···160
ВАЛ5 (6,5—8,5 Si; 0,35—0,55 Mg; 0,1—0,3 Ti; 0,15—0,4 Be)	300···573···673	150···160···160
ВАД1 отожженный (3,8—4,5 Cu; 2,3—2,7 Mg; 0,5—0,8 Mn; 0,08—0,15 Ti)	20···80···300	30···61···160
ВД17 (2,6—3,2 Cu; 2—2,4 Mg; 0,45—0,7 Mn)	300···673	130···170
Д1 отожженный (3,8—4,8 Cu; 0,4—0,8 Mg; 0,4—0,88 Mn)	20···40···80···150···293	30···55···97···125···170
Д16 закаленный, естественно состаренный (3,8—4,8 Cu; 1,2—1,8 Mg; 0,3—0,9 Mn)	10···20···40···80···150···300	9···19···37···61···90···120
То же	300···573	120···160
Д20, закаленный, искусственно состаренный (6—7 Cu; 0,4—0,8 Mn; 0,25—0,45 Mg; 0,1—0,2Ti)	20···40···80···150···300	27···38···61···85···140
То же	300···673	140···160

Таблица 15.11. **Теплопроводности сплавов титаиа** [44]

Сплав (массовый состав, %)	T, К	λ^{*1}, Вт/(м·К)
ВТ1 отожженный на воздухе в течение 40 мин при $T = 873$ К (0,014 C; 0,16 Fe; 0,045 Si; 0,028 N; 0,0092 H) [24]	10···20···40···80···150···300	5,5···10···14···18···20···16
ВТ5 (4,3—6,2 Al)	300···673···973	8,8···12···17
ВТ6С (5,3—6,8 Al; 3,5—5 V)	300···673···973···1173	8,4···13···17···20
ВТ8 (6—7,3 Al; 2,8—3,8 Mo; 0,2—0,4 Si) [22]	300	7,1
ВТ14 (3,5—6,3 Al; 2,5—3,8 Mo; 0,9—1,9 V)	300···673···973···1173	8,4···13···17···20
ВТ16 (1,8—3,8 Al; 4,5—5,5 Mo; 4—5,5 V)	300···673···973···1173	10···15···18···21
ВТ3-1 (5,5—7 Al; 2—3 Mo; 0,8—2,3 Cr; 0,15—0,4 Si) [22]	300	7,9
ОТ4 (3,5—5 Al; 0,8—2 Mn)	300···673···873	9,6···13···16
ОТ41 (1—2,5 Al; 0,7—2 Mn)		
ОТ40 (0,2—1,4 Al; 0,2—1,3 Mn)	300···673···973···1173	13···15···18···20
ОТ42 (5,7—6,7 Al; 1—2,3 Mn)	300···673···973···1173	7,1···13···18···21

*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.12. **Теплопроводности сплавов магния** [24, 45]

Сплав (массовый состав, %)	T, К	λ^{*1}, Вт/(м·К)
МА1 (1,3—2,5 Mn)	300···473···673	126···138···134
МА2 (3—4 Al; 0,15—0,5 Mn; 0,2—0,8 Zn)	300···473···673	96···105···113
МА2-1*2 (3,8—5 Al; 0,4—0,8 Mn; 0,8—1,5 Zn; 0,1 Ca)	20···80···300	13···26···96
МА5 (7,8—9,2 Al; 0,15—0,5 Mn; 0,2—0,8 Zn)	300	59
МА8*3 (1,5—2,5 Mn; 0,15—4,35 Ca)	300	130
МА11 (1,5—2,5 Mn; 2,5—3,5 Nd)	300···473···673	110···117···117
МА15 (2,5—3,5 Zn; 0,45—0,9 Zr) [46]	300	110
ВМ65-1 (5—6 Zn; 0,3—0,9 Zr)	300···473···673	117···126···126
ВМД1 (1,2—2 Mn; 2,5—3,5 Th)	300	130
ВМС1 (3—4 Al; 1,2—2 Zn; 0,4—0,9 Zr)	293	96
МЛ2*4 (1—2 Mn)	293	130

Продолжение табл. 15.12

Сплав (массовый состав, %)	T, К	λ*1, Вт/(м·К)
МЛ3*4 (2,5—3,5 Al; 0,15—0,5 Mn; 0,5—1,5 Zn)	293	105
МЛ4*5 (5—7 Al; 0,15—0,5 Mn; 2—3 Zn)	293	80
МЛ5*5 (7,5—9 Al; 0,15—0,5 Mn; 0,2—0,8 Zn)	293	77
МЛ6*6 (9—10,2 Al; 0,1—0,5 Mn; 0,6—1,2 Zn)	293	77
МЛ8 (5,5—6,6 Zn; 0,7—1,1 Zr; 0,2—0,8 Cd) [46]	293	120
МЛ10*6 (0,1—0,7 Zn; 0,4—1 Zr; 2,2—2,8 Nd)	293	110
МЛ12*7 (4—5 Zn; 0,6—1,1 Zr)	293	130
МЛ14*7 (1,7—2,3 Al; 0,5—1 Zr; 2,6—3,8 Th)	293	110
МЛ15*7 (4—5 Zn; 0,7—1 Zr; 0,6—1,2 La)	293	140
ВМЛ1*6 (0,5—1 Zr; 2,5—4 Th)	293	110

*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.
*2 Отожженный в течение 30 мин при $T = 533$ К.
*3 То же при $T = 623$ К.
*4 Литой.
*5 Закаленный.
*6 Закаленный и состаренный.
*7 Состаренный.

Таблица 15.13. **Теплопроводности жаростойких и жаропрочных сплавов и сплавов на основе тугоплавких металлов [7, 22]**

Сплав (массовый состав, %)	T, К	λ*1, Вт/(м·К)
ХН60В (Ni; ⩽0,1 C; 23,5—26,5 Cr; 0,3—0,5 Ti; ⩽0,5 Al; 13—16 W; 4 Fe)	200···300···600···1000	9,0···9,8···14···23
ХН60Ю (⩽0,1 C; 15—18 Cr; 2,6—3,5 Al; ⩽0,3 Mn; ⩽0,8 Si; 55—58 Ni)	200···300···800···1400	8,0···9,6···19···29
ХН70ВМЮТ (Ni; ⩽0,12 C; 13—16 Cr; 2—4 Mo; 0,1—0,5 V; 5—7 W; 1,8—2,3 Ti; ⩽5 Fe; 1,7—2,3 Al) } ХН70ВМТЮ (Ni; 0,1—0,16 C; 14—16 Cr; 1—1,4 Ti; 1,7—2,2 Al; 4—6 W; 3—5 Mo)	200···300···800···1400	7···8···18···24
ХН77ТЮ, ХН77ТЮР (Ni; 19—22 Cr; 2,4—2,8 Ti; 0,6—1 Al)	200···300···600···1000	11···12···16···24
ХН78Т (Ni; 0,12 C; 19—22 Cr; 0,15—0,35 Ti; 0,15 Al; 1Fe)	300···900	13···23
ХН80ТБЮ (Ti; ⩽0,08 C; ⩽1 Mn; 15—18 Cr; ⩽3Fe; 1—1,5 Nb; 1,8—2,3 Ti; 0,5—1 Al)	200···300···800···1400	11···12···21···27
МВ50 (W; 47,5—50 Cu)	573···773···973···1173	90···86···86···92
ВР20*2 (W; (20±0,5) Re)	523···773···973···1173	50···54···63···75
ВМ1 (Mo; 0,01 C; 0,08—0,25 Zr; 0,4 Ti) } ВМ2 (Mo; 0,02 C; 0,25—0,4 Zr; 0,2 Ti) } ВМ3 (Mo; 0,25—0,5 C; 0,3—0,6 Zr; 0,8—1,3 Ti; 1—1,8 Nb)	373···773···1473···2173	130···120···110···90
ЦМВ30 (Mo; 0,01 C; 30 W)	673···973	120···100
Nb_3Sn, сверхпроводник-((70,5±0,05) Nb), $T_c = 18,3$ К[47]	4···6···10···20···40···80	0,038···0,13···0,65······2,6···2,8···2,4

*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.
*2 Сплав термоэлектродный.

Таблица 15.14. **Теплоповодности сплавов на основе благородиых металлов [24]**

Продолжение табл. 15.14

Сплав (массовый состав, %)	T, К	λ*1, Вт/(м·К)
Ag — Cu (92,5 Ag; 7,5 Cu)	300	350
(90 Ag; 10 Cu)	300	345
(80 Ag; 20 Cu)	300	340
(50 Ag; 50 Cu)	300	310
Ag — Pd (95 Ag; 5 Pd)*2	300	220
(90 Ag; 10Pd)*2	300	140
(80 Ag; 20 Pd)*2	300	92
(50 Ag; 50 Pd)*2	300	35
Ag — Au зарубежного производства (99,63 Ag; 0,37 Au)*3, *4 [7]	20···40···80···100	290···330···350···360
(90Ag; 10Au)	300	200
(30Ag; 70Au)	300	290
Pt — Rh (90Pt; 10Rh)*3 [36]	300—400	30
Pt — Ir (90Pt; 10Ir)*5	300	30

Слав (массовый состав, %)	*T*, К	λ*1, Вт/(м · К)
(80Pt: 20Ir)*5	300	18
(70Pt: 30Ir)*5	300	16
Au—Fe зарубежного производства, отожженный, ρ (300 К)/ρ_0 = =9,0 (Au; 0,03 Fe)*3,*4 [7]	4···10···20···40···80···300	50···130···210···240···250···310
Au—Co зарубежного производства, холоднотянутый (Au; 2,1 Co)*3, *4 [7]	4···10···20···40···80···100	1,0···4,2···8,5···14···20···24

*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.
*2 Механически обработан в холодном состоянии.
*3 Сплав термоэлектродный.
*4 Атомный состав, %.
*5 Штампован в холодном состоянии.

Таблица 15.15. **Теплопроводности сплавов на основе радиоактивных металлов** [22]

Сплав (массовый состав, %)	*T*, К	λ*1, Вт/(м·К)
U—Al (99 U; 1 Al)	200···300···900	14···14···13,6
(90 U; 10 Al)	200···300···900	10···10···9,8
(70 U; 30 Al)	200···300···800	31···30···28
(50 U; 50 Al)	200···300···500···700	68···66···54···34
(10 U; 90 Al)	300	190
UAl_3, γ = 6,8 г/см³	300	26
U_3Si, γ = 15,6 г/см³	300	20
U_3Si_2, γ = 12,2 г/см³	300	14
U—Cr (95U; 5Cr)	300	21
(90 U; 10 Cr)	300	17
(70 U; 30 Cr)	300	10
(50 U; 50 Cr)	300	8,5
(30 U; 70 Cr)	300	16
U—Fe (95 U; 5Fe)	300	24
(90 U; 10Fe)	300	22
(70 U; 30Fe)	300	17
(50 U; 50 Fe)	300	20
(30 U; 70 Fe)	300	33
U—Zr (95 U; 5 Zr)	300	19
(90 U; 10 Zr)	300	14
(70 U; 30 Zr)	300	6
(50 U; 50 Zr)	300	5
(30 U; 70 Zr)	300	6
U—Mo (95 U; 5 Mo)	300	25
(90 U; 10 Mo)	300	23
(70 U; 30 Mo)	300	27
(50 U; 50 Mo)	300	40
(10 U; 90 Mo)	300	110
UBi	300	21
U_3Bi_4	300	19
UBi_2	300	17
(65 U + 20 Pu + 5 Mo + +10 продуктов деления)	479···808···868	15···23···22
(70 U + 20 Pu + 10 продуктов деления)	323···573···873···1073	9,6···16···24···30

Сплав (массовый состав, %)	*T*, К	λ*1, Вт/(м · К)
Th—U (90 Th; 10 U)	323···1073	36···44
(80 Th; 20 U)	323···1073	35···43
(Zr + 8 U)	373···723	14···17
(Zr + 8 U + 1 H)	373···473···673	20···18···17

Таблица 15.16. **Теплопроводности припоев и подшипниковых материалов** [46]

Сплав (массовый состав, %)	*T*, К	λ*1, Вт/(м · К)
Алюминиевые антифрикционные сплавы		
АН2,5 (Al; 2,7—3,3 Ni)	300	130
АО6-1 (Al; 5,5—7 Sn; 0,7—1,3 Cu; 0,7—1,3 Ni)	300	180
Баббиты		
БКА (Pb; 0,95—1,15 Ca; 0,7—0,9 Na; 0,05—0,2 Al)	300	21
Б16 (Pb; 15—17 Sn; 15—17 Sb; 1,5—2 Cu)	300	25
Б83 (Sn; 10—12 Sb; 5,5—6,5 Cu)	300	33
Б88 (Sn; 7,3—7,8 Sb; 2,5—3,5 Cu; 0,8—1,2 Cd; 0,15—0,25 Ni)	300	39
Припои		
ПОС61 (Pb; 60—62 Sn)	300	50
ПОС18 (Pb; 18Sn; 2,5Sb) [22]	300	38
ПОССу18-2 (Pb; 17—18 Sn; 1,5—2,0 Sb)	300	34
ПОССу40-2 (Pb; 39—41 Sn; 1,5—2,0 Sb)	300	42
(60 Sn; 40 Pb) [24]	4···10···40···80···300	18···40···51···49···50
Сплав Вуда (50Bi; 25Pb; 12,5Cd; 12,5Sn) [24]	4···10···20···40···80···100	4,0···11···18···20···23···24
Сплав Розе (56,1Bi; 28Pb; 15,9Sn) [24]	10···20···80···150···273	3,4···5···8,4···11···16
ПСр25 (Zn; (25±0,3) Ag; (40±1) Cu)	300	105
ПСр44 ((44±1)Ag; (27±1)Cu; (16±2) Zn; (8±1) Cd; (2±0,5) Ni) (3±0,5) Mn)	300	38
ПСр70 (Zn; (70±0,5) Ag; (26±0,5) Cu)	300	170

*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.17. **Теплопроводности полупроводников, Вт/(м·К) [7, 25]**

Полупроводник	T, К					
	10	20	40	80	150	300
Cd_3As_2 нелегированный, $n = 2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	—	—	—	—	2,7	2,8
CdSb p-типа, $n = (3 \div 5) \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$, $\parallel$ [001]	—	—	—	4,9 (100 К)	3,0	1,9
ZnSb, чистота исходного материала 99,9999%	260	210	40	11,5	5,2	5,0
ZnO*1, концентрация примесей $\leqslant 2{,}5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ [48]	300	520	450	260	134	54
ZnS, гексагональная структура, концентрация примесей $\leqslant 5 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ [48]	300	380	310	155	70	27
CdS, концентрация примесей $\geqslant 10^{16}$ см$^{-3}$, $\parallel$ оси c	540	360	200	97	43	20
CdSe n-типа, чистота исходного материала $>$ 99,99%, нелегированный, $\parallel$ оси c	230	200	72	32	—	—
CdTe, концентрация примесей $\leqslant 2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ [48]	520	250	117	44	18,4	7,5
HgSe n-типа, n (4,2 К) $= 2{,}1 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ [49]	120	93	41	11	4,4	1,7
HgTe p-типа, концентрация акцепторов $10^{18} - 10^{19}$ см$^{-3}$	—	—	25 (60 К)	14	5,0	2,6
BN*2 [50]	—	2,0	10	43	112	180
AlN*3 [50]	65	100	175	290	330	200
AlSb p-типа, R (300 К) = 7,0 см^3/Кл	72	280	330	210	115	69 (250 К)
GaP p-типа, R (300 К) = 75 см^3/Кл	190	590	700	450	210	140 (250 К)
GaAs n-типа, n (77 К) $= 2 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$	1400	2500	780	270	105	58
GaSb p-типа, $n = 1{,}5 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$	140	340	320	180	85	36
InP n-типа, n (77 К) $= 2 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$	1800	2700	1200	470	190	70
InAs n-типа, n (77 К) $= 3 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$	2900	1700	600	170	—	—
InSb n-типа, $n = 7 \cdot 10^{13}$ см$^{-3}$	2000	1100	370	90	42	—
SiC n-типа, концентрация атомов N 10^{17} см$^{-3}$, $\parallel$ оси c	350	1900	5100	4100	1500	490
PbS p-типа, n (300 К) $= 1{,}7 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	70	48	13	8,0	—	—
PbS природный, n (300 К) $= 1{,}48 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$	—	—	—	5,5 (100 К)	3,9	2,6
PbSe p-типа, n (300 К) $= 5{,}4 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$	70	37	11,5	5,2	—	—
PbSe n-типа, $n = 6{,}4 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$, легированный Cu	—	—	—	5,0	3,0	1,8
Bi_2Te_3 n-типа, n (77 К) $= 3 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$	—	—	—	6,4	3,5	2,9

*1 Приведены средние значения теплопроводности ZnO гексагональной струкутры: $\lambda_{ср} = 1/3\,(2\lambda_a + \lambda_c)$, где λ_a и λ_c — теплопроводности вдоль осей a и c соответственно; для $30 < T < 300$ К $\lambda_a/\lambda_c = 1{,}2$.

*2 Горячепрессованная поликристаллическая керамика плотностью 97% теоретической, размер зерен 20 мкм, концентрация примесей O и C меньше $2 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$.

*3 Синтетический монокристалл, атомное содержание кислорода $(1 \div 5) \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$.

Обозначения: n-концентрация носителей тока; R— постоянная Холла.

Таблица 15.18. **Теплопроводности некоторых диэлектрических монокристаллов, Вт/(м·К) [7, 25]**

Кристалл (атомное содержание, %)	T, К						
	4	10	20	40	80	150	300
BeO [50, 51]	47	750	5100	13 500	6700	1360	370
MgO	270 (6 К)	1100	3000	2200	460	135	58
Al_2O_3*1	240	3000	12 500	13 500	1100	125	40
Сапфир*2, $\parallel$ оси c	125	2300	10 000	11 500	1100	155	47
SiO_2*3, $\parallel$ оси c	470	2700	530	150	60	27,3	14,3
TiO_2	180	1750	600	65	18	—	—
NiO_2	5	60	220	430	280	120	38
UO_2*4	8,6	9,6	1,65	1,4	4,2	7,7	8,4
LiF:							
(0,02% Li)	510	6000	10 000	1380	—	—	—
(7,4% Li)*5	440	2700	2800	930	127	—	—
(50,1% Li)	370	1900	1800	700	115	37	—
NaF*6, $\parallel$ [100], [52]	750	10 000	14 000	620	130	—	—

Кристалл (атомное содержание, %)	T, K						
	4	10	20	40	80	150	300
CaF_2, ‖ [100]	700	2600	2800	570	60	22	12,5
MnF_2*7, ‖ оси *a*	67	430	450	135	40	16	7,7
CoF_2*8	4,2	[illegible]	27	19,5	25	15,5	—
NaCl	530	900	300	80	34	15,5	7,4
KCl	630	510	225	70	20	—	—
RbCl	310	190	85	30	11	—	—
NaBr	95	160	70	27	13	—	—
KBr	480	250	90	34	15,5	—	4,8
KI	700	360	130	39	12	—	5,02
$SrTiO_3$*9, ‖ (100)	1,5	8,5	20	19	18	16	12
$Y_3Fe_5O_{12}$*10, ‖ [100]	13,5	125	220	112	37	15	7,4

*1 Размеры образца: диаметр 5 мм, длина 50 мм.
*2 Концентрация примесей Cr, Fe, Mg, Si меньше 10^{-5} $см^{-3}$.
*3 Размеры образца 5×5×40 мм.
*4 Антиферромагнетик при $T < 30$ K.
*5 Нормальный изотопический состав.
*6 Атомное содержание примесей меньше $1 \cdot 10^{-6}$ $см^{-3}$, сечение образца 5,1×5,1 мм.
*7 Антиферромагнетик при $T < 67$ K.
*8 Антиферромагнетик при $T < 38$ K, ось образца составляет угол 26° с осью *c*.
*9 Параэлектрик, температуры переходов 35, 65 и 110 K.
*10 Ферримагнетик при $T < 560$ K, средний диаметр образца 3,9 мм, длина 11,3 мм.

Таблица 15.19. **Теплопроводности стекол [24, 53]**

Материал*1 (массовый состав, %)	T, K	λ*2, Вт/(м·K)
Кварцевое стекло (плавленый кварц)	4···10···20···40···80···100	0,13···0,135···0,16···0,25···0,52···0,70
То же [54]	60···80···160···300···500···800···1100	0,41···0,52···0,96···1,36···1,63···1,81···1,98
То же, КВ [38]	60···70···80···90	0,45···0,52···0,58···0,64
Крон:		
легкий ЛК5	90···150···300	0,52···0,87···1,2
баритовый серии 100БК1 10	293	0,75
Стекло:		
боросиликатное С38-1 (ЗС-9)	300	0,92
боросиликатное С39-1 (№ 17)	300	1,3
боросиликатное С47-1 (№ 46)	300	0,84
боросиликатное (пирекс) (80 SiO_2; 13 B_2O_3; 2 Al_2O_3; 4 ($Na_2O + K_2O$))	20···80···150···300	0,142···0,54···0,84···1,34
известково-натриевое	20···80···150···300	0,142···0,46···0,70···1,05
свинцовое тугоплавкое (40—50 PbO)	20···80···150···300	0,142···0,36···0,51···0,71
Фарфор [55]	80···150···300···500···700···1140	0,96···1,35···1,68···1,72···1,81···2,25
Фаянс разных сортов	300	0,93—1,3
Флинт:		
тяжелый ТФ1	90···150···300	0,34···0,52···0,70
баритовый БФ8	293	0,81
Хрусталь, $\gamma = 2,6 \div 2,85$ г/см³ [15]	293	0,88—0,91

*1 Образцы отожженные.
*2 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.20. Теплопроводности плотных (пористость $П = 0\%$) спеченных оксидов [22]*1

Оксид	γ, г/см³	T, K	λ*2, Вт/(м·К)
Al_2O_3	3,7—3,8	400···700···1100···1500···2000	30···13···7···5···7
BeO [51]	3,01	400···700···1000···1500···2000	230···89···48···22···15
CaO	3,0—3,1	400···700···1500···2200	15···9···6···8
SiO_2	2,3—2,6	400···700···1300···1500	13···9···6···7
MgO	3,3—3,5	400···700···1100···1700···2000	36···16···8···6···9
NiO	5,0—5,1	400···700···1700	13···6···5
TiO_2	4,0—4,1	400···700···1500	8···5···3
ZrO_2	5,2—5,3	400···900···1500···2000	1,7···1,8···2,0···2,0

*1 Экспериментальные данные о теплопроводности оксидов см. также в [56].
*2 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.21. Теплопроводности прессованных и спеченных карбидов [22, 57]

Карбид	γ, г/см³	T, K	λ*1, Вт/(м·К)
B_4C	2,32—2,5	300···1100	28···13
Be_2C (в Ar)	2,2	300···900	32···18
Cr_3C_2	6,68	293	13
$Cr_{23}C_6$	6,97	293	18
HfC	11,8—12,6	573···1473	9···17
Mo_2C	9,18	293	7
NbC	7,82	400···1200···2500	14···44···44
Nb_2C	7,85	400	19
SiC	3,2	200···300···600···1000···1800···2500	36···31···23···16···12···14
TaC	14,5	573···1673···2673	34···40···38
Ta_2C	15,5	293	36
TiC	4,72—4,92	523···973	33···11
VC	5,48	293	25
WC	15,65	293	29
W_2C	17,3	293	36
ZrC	6,7	573···1673···2673	53···35···38

*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.

Таблица 15.22. Теплопроводности прессованных и спеченных боридов, нитридов и силицидов при комнатной температуре [22]

Соединение	γ, г/см³	λ, Вт/(м·К)	Соединение	γ, г/см³	λ, Вт/(м·К)
BaB_6	—	36	Mo_2N	9,9	50
CaB_6	—	23	NbN	8,4	10
CrB_2	5,6	22	TaN	13,8	23
Mo_2B_5	8,0	27	TiN	5,21	29
NbB_2	6,0	17	VN	6,04	31
SrB_6	—	26	ZrN	7,35	14

Продолжение табл. 15.22

Соединение	γ, г/см³	λ, Вт/(м·К)	Соединение	γ, г/см³	λ, Вт/(м·К)
TaB_2	11,7	11	$CrSi_2$	4,4	6
TiB_2	4,5	24	$MoSi_2$	6,3	29
W_2B_5	11,0	32	$NbSi_2$	5,45	26
ZrB_2	6,1	23	$TaSi_2$	8,83	12
CrN	5,9	32	$TiSi_2$	4,35	13
Cr_2N	6,5	60	WSi_2	9,33	19
MoN	8,6	16	$ZrSi_2$	4,88	18

Таблица 15.23. Теплопроводности плотных обожженных огнеупоров при атмосферном давлении [58]

Изделие (массовый состав, %)	γ, г/см³, при t=20 °С	П*1, %	λ, Вт/(м·К), при t, °С				
			200	400	800	1200	1600
Из кварцевого стекла ($\geqslant 97\ SiO_2$)	2,2—2,09	0—3	1,4	1,9	3,0	4,5	—
Динасовые ($\geqslant 93\ SiO_2$)	1,67—1,50	24—30	0,42	0,34	0,46	0,94	1,8
Динасовые с добавками ($80 \leqslant SiO_2 \leqslant 93$)	2,10—1,93	10—16	1,6	1,7	1,9	2,3	3,0
Полукислые ($< 28\ Al_2O_3$; $< 85\ SiO_2$)	2,14—1,99	16—20	1,25	1,4	1,8	2,1	—
Шамотные ($28 \leqslant Al_2O_3 \leqslant 45$)	1,95—1,80	24—30	0,85	0,92	1,1	1,2	—
Муллитокремнеземистые ($45 < Al_2O_3 < 62$)	2,16—1,92	16—20	0,88	0,94	1,1	1,2	1,1
Муллитовые ($62 < Al_2O_3 < 72$)	2,45—2,26	16—20	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	3,00—2,85	0—3	5,6	4,9	4,1	3,8	3,9
	2,52—2,34	20—24	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8

Изделие (массовый состав, %)	γ, г/см³, при $t = 20$ °С	$П$*1, %	λ, Вт/(м·К), при t, °С				
			200	400	800	1200	1600
Муллитокорундовые ($72 < Al_2O_3 < 90$)	2,89—2,68	16—20	2,7	2,6	2,4	2,3	2,3
Корундовые (глиноземистые) (>90 Al_2O_3)	3,9—3,7	0—3	20	12,8	6,7	5,2	6,2
	3,12—2,89	20—24	4,1	3,5	2,7	2,4	2,5
Периклазовые (⩾ 90 MgO)	3,55—3,37	0—3	26	17	8,3	5,6	6,2
	2,84—2,63	20—24	5,7	4,8	3,4	2,7	2,7
Форстеритовые ($50 \leqslant MgO \leqslant 65$; $25 \leqslant SiO_2 \leqslant 40$)	3,36—3,19	0—3	4,5	3.9	3,1	2.9	3,3*2
	2,69—2,49	20—24	3,3	2,8	2,0	1,8	—
Карбидкремниевые на различных связках (>70 SiC)	3,13—2,97	0—3	35	32	27	22	19
	2,50—2,32	20—24	13	12	9,7	8,1	7,2*2
Бадделеитовые (> 90 ZrO_2)	5,80—5,51	0—3	1,8	1,7	1,7	1,9	2,3
Цирконовые (>50 ZrO_2; >25 SiO_2):							
плавленые	3,40—3,14	20—24	1,8	1,6	1,4	1,3	1,25*2
поликристаллические	4,60—4,37	0—3	5,7	5,1	4,3	3,9	4,0
	3,86—3,59	16—20	4,6	4,2	3,5	3,2	3,1

*1 Пористость открытая.
*2 При $t = 1500$° С.

Таблица 15.24. **Теплопроводности высокотемпературных композиций ядерного топлива [22]**

Соединение (массовый состав, %)	γ, г/см³	T, К	λ*1, Вт/(м·К)
UO_2, спеченный диоксид [59]	10,97	300···600···1000···1600···2600···3120	8,2···5,6···3,7···2,4···3,3···3,4
ThO_2, спеченный диоксид, $П = 0$%	9,96	400···500···700···1100···1800	8,2···6,9···4,6···3,0···2,0
PuO_2, спеченный диоксид, $П = 0$%	11,46	200···300···700···1100···1500	7,2···6,3···4,2···3,1···2,2
(50 UO_2 + 50 PuO_2)	11,1	300	4,3
(60 UO_2 + 40 Al), спеченная смесь	4,9	300	7,0
(47 UO_2 + 53 BeO), спеченная смесь	3,2—3,6	300	23—35
(19,9 UO_2 + 80,1 C), спеченная смесь	1,93	300	18
(60 UO_2 + 40 MO)*2	—	373···1273	32···27
(50 UO_2 + 50W)*2	—	373···773···1273	52···44···42
(20 UO_2 + 80 полиэтилен)	—	273···363	0,31···0,24
(20 UO_2 + 60 полиэтилен + 20 сажа)	—	273···363	0,37···0,33
U_3O_8	7,90	300	6,8
UC	—	373···673···1100	25···22···27
UC_2	10,8	473···1873	13···20
(30,3 UC + 69,7 C), спеченная смесь	2,22	300	57
UN (94,3 U; 5,32 N; 0,034 C; 0,047 O)	14,02	473···1073	16···21
US	10,87	300	11
$PuBe_{13}$	4,36	300	90

*1 Теплопроводности соответствуют указанным температурам.
*2 Объемное содержание, %.

Обозначения: $П$ — пористость.

Таблица 15.25. **Теплопроводности строительных материалов при $t = (25 \pm 5)$°С и атмосферном давлении [22, 23]**

Материал	γ, г/см³	λ, Вт/(м·К)
Алебастровые плиты	1,25	0,47
	0,84	0,27
Асбошифер	1,9	0,35
Асфальт	1,8	0,72
Бетон в сухом состоянии:		
на песке и кирпичном щебне	1,82	0,70
на каменном щебне	2,0	1,3
железобетон [60]	2,4	1,6
пенобетон	0,3	0,12
	0,8	0,33
Гипс строительный [60]	1,25	0,35
Грунт сухой (влажный) [60]:		
глинистый и суглинки	1,6	0,87 (1,7)
	2,0	1,7 (2,6)
пески и песчаный	1,6	1,1 (1,9)
	2,0	2,0 (3,2)
скальный	2,0	2,0 (2,7)
	2,4	2,3 (3,5)
Гудрон	0,95	0,30
Доломит плотный в сухом состоянии	2,48	1,7
Зола древесного топлива	0,7	0,15
Известняк плотный в сухом состоянии	2,32	1,9
Картон:		
плотный	1,0	0,23
обыкновенный	0,7	0,17
гофрированный в несколько слоев при толщине слоя 5 мм	0,09	0,07
Кирпич в сухом состоянии:		
клинкерный	2,25	1,6
красный плотный	1,8	0,67
красный пористый	1,2	0,44
кремнеземный	0,5	0,12
силикатный	1,9	0,81
трепельный	1,13	0,27
шлаковый	1,4	0,58
Песок сухой	1,6	0,87
Раствор:		
портландцементный (без песка)	1,8	0,47
цементно-песчаный	1,8	1,2
известково-песчаный	1,8	0,87
Рубероид	0,6	0,17
Толь бумажный	0,5	0,23
Шлак:		
котельный	1,0	0,29
	0,7	0,19
доменный гранулированный	0,5	0,15

Таблица 15. 26. **Теплопроводности древесных материалов [15, 22]**

Материал	γ, г/см³	t, °С	λ^{*1}, Вт/(м·К)
Бальза	0,11—0,13	30	0,043—0,052
Береза	0,72	20	0,15
Дуб	0,825	15	0,20
Ель	0,45	60	0,11
Кедр красный	0,47	20	0,095

Материал	γ, г/см³	t, °С	λ^{*1}, Вт/(м·К)
Клен	0,72	30	0,19
Лиственница	0,6	20	0,13
Пробковое дерево	0,113	30	0,045
Сосна:			
поперек волокон	0,545	15	0,15
вдоль волокон	0,545	15	0,40
Тополь	0,58	50	0,17
Фанера	0,6	20	0,15
Опилки в качестве засыпки	0,25	20	0,093
Стружка в качестве набивки	0,30	20	0,12

*1 Теплопроводности древесины приведены в направлении, перпендикулярном волокнам. Теплопроводность вдоль волокон в 2—3 раза выше теплопроводности поперек волокон. Влажность материалов 7 — 10%. Теплопроводность сухой древесины, Вт/(м·К), можно оценить по формуле $\lambda \approx 0.0232 + 0.174\,\gamma$, где γ — плотность древесины, г/см³.

Таблица 15.27. **Теплопроводности строительных теплоизоляционных материалов при атмосферном давлении [60]**

Материал	γ, г/см³	t^*_{max}, °С	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)
Альфоль:			
гофрированный	0,02—0,04	350	$59+0,26t$
гладкий	0,02—0,04	350	$53+0,22t$
Асбестовый матрац, заполненный:			
совелитом	0,28	450	$87+0,12t$
стекловолокном	0,20	450	$58+0,23t$
вермикулитом	0,22	450	$81+0,23t$
Асбестовая ткань в несколько слоев	0,5—0,6	450	$120+0,26t$
Асбестовермикулитовые изделия (плиты, сегменты, скорлупы)	0,25	600	$81+0,23t$
	0,30	600	$88+0,23t$
Вермикулит, вспученный в засыпке	0,23	900	$70+0,27t$
Войлок:			
строительный	0,20	100	$44+0,19t$
утеплительный	0,10	100	$60+0,23t$
эластичный из минеральной ваты	0,115	600	$43+0,22t$
Вулканитовые изделия (плиты, сегменты, скорлупы)	0,35	600	$79+0,15t$
	0,40	600	$84+0,15t$
Диатомитовые изделия	0,5	900	$100+0,23t$
	0,6	900	$140+0,23t$
Известково-кремнеземистые изделия (плиты, сегменты, скорлупы)	0,2	600	$69+0,15t$

Продолжение табл. 15.27

Материал	γ, г/см³	t^*_{max}, °С	λ, 10^{-3} Вт/(м·К)
Мастичные материалы:			
асбозурит-600	0,60	900	$160+0,17t$
асботермит	0,57	500	$130+0,1t$
совелит	0,50	500	$99+0,1t$
ньювель	0,37	350	$77+0,1t$
Маты и полосы из непрерывного стекловолокна	0,20	450	$40+0,26t$
Минеральная вата:			
марки 75	0,115	600	$44+0,29t$
марки 150	0,23	600	$53+0,19t$
Пенодиатомитовые изделия, кирпич:			
марки ПД-350	0,35	900	$81+0,19t$
марки ПД-400	0,40	900	$93+0,19t$
Перлитовые изделия на керамической связке (плиты, сегменты, скорлупы):			
марки 250	0,25	900	$70+0,19t$
марки 400	0,40	900	$99+0,19t$
Перлитоцементные изделия (полуцилиндры, плиты, сегменты):			
марки 250	0,25	600	$70+0,19t$
марки 350	0,35	600	$81+0,19t$
Перлит вспученный мелкий:			
марки 75	0,09	875	$52+0,12t$
марки 150	0,18	875	$58+0,12t$
Пенобетонные изделия	0,40	400	$110+0,3t$
	0,50	400	$130+0,3t$
Пенопласт ФРП-1 и резопен:			
группы 75	0,065—0,085	130	$41+0,23t$
группы 100	0,086—0,11	150	$43+0,19t$
Плиты теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем:			
марки 50	0,055—0,075	400	$40+0,29t$
марки 175	0,15—0,21	400	$52+0,2t$
Совелитовые изделия (полуцилиндры, плиты, сегменты):			
марки 350	0,35	500	$75+0,15t$
марки 400	0,40	500	$78+0,15t$
Торфоплиты, сегменты, скорлупы	0,275	100	$64+0,15t$
	0,35	100	$76+0,15t$
Холст стекловолокнистый ВВ-Г	0,10	180	$38+0,15t$
Холсты из микроультрасупертонкого штапельного волокна горных пород	0,03—0,07	700	$41+0,29t$

*1 Максимальная температура, при которой можно применять материал.

Таблица 15.28. **Теплопроводиости некоторых теплоизоляционных и вспомогательных материалоа** [15, 24, 61]

Материал (массовое содержание, %)	γ, г/см³	t, °С	λ*1, 10^{-3} Вт/(м·К)
Асбест волокнистый	0,47	—200···20	81···160
	0,70	—200···20	150···240
Ацетилцеллюлоза	1,32	20	200—300
(60 аэрогель-В + 40 алюминиевой пудры)	0,18	$-180<t<20$	0,35
Бумага толщиной 75 мкм [22]	0,73	20	96
Вата:			
минеральная	0,10	—200···20	16···47
	0,25	—100···20	36···57
стеклянная	0,15	—173···27	20···52
хлопковая	0,05	—200···20	26···59
	0,081	—200···20	32···59
Войлок:			
графитированный (вакуум, $d = 10 \div 20$ мкм)	0,04—0,12	1000···1800	400···1200
графитированный углеродный (аргон)	0,05—0,10	20···800	80···280
из карбида циркония (аргон, $d = 16$ мкм, $П = 80\%$)	—	200···1800	800···1200
стеклянный	0,05	—200···20	14···44
Волокно:			
базальтовое	0,12	20···400	38···78
каолиновое ($d = 4$ мкм)	0,10	200···1100	60···380
Ипорка*2	0,015	20	38
Картон теплоизоляционный БТК-1	—	—260···0	23···39
	—	750	84
Каучук:			
натуральный	0,086	50	42
фторированный ФК-20	0,18	—200···20	23···59
вспененный отвержденный	0,082	—190···20	15···33
Кожа	1,0	20	170
Лед	0,9	0	2200
Майлар (лавсан)	—	—200···20	110···150
Пенолегковес высокоглиноземистый (аргон)	0,80	200···1400	400···480
Пенопласт:			
ПС-1 ($d_{пор} = 0,5$ мм)	0,10	—170···20	15···40
ПС-4 ($d_{пор} = 1,5$ мм)	0,07	—170···20	18···44
Пенополиуретан:			
ППУ-104Б	0,39	—170···20	38···67
ППУ-305А	0,14	—100···20	25···43
Пеностекло	0,17	—180···20	49···62
	0,25	—180···20	61···80
Перлит (воздух, $p = 0,13$ Па)	0,20	$-190<t<20$	0,83

Продолжение табл. 15.28

Материал (массовое содержание, %)	γ, г/см³	t, °С	λ^{*1}, 10^{-3} Вт/(м·К)
Плексиглас аморфный прозрачный	1,174	—190···0	150···200
Плитка теплоизоляционная ПМТБ-2	—	—260······0···750	15···36···96
Полистирол	1,06	20	82
Поролон	0,034	—190···20	13···40
Порошок:			
Al_2O_3 (d=0,21мм, $П$=51 %)	—	200···800	360···600
MgO (d=0,18 мм, $П$=42 %)	—	200···800	480···780
ZrO_2 (d=0,20 мм, $П$=42 %)	—	200···800	250···450
Пробка измельченная ($d\leqslant 3$ мм)	0,037	—200···20	9···34
	0,161	—70···27	36···50
Резина;			
натуральная	—	—180···20	11···150
синтетическая	—	—200···20	120···170
Слюда;			
мусковит, ⊥ плоскости спайности	2,8	30	550
∥ плоскости спайности	2,8	30	3400
флогопит, ⊥ плоскости спайности	2,8	20···600	450···570
Снег [62]	0,25	0	160
Стеклотекстолит, ⊥ армирующим слоям	—	—223···20	190···390
Тальк (воздух, p= = 0,13 Па)	1,2	$-180<t<$ <20	1,6
Тефлон	2,12	—190···10	230···260
Ткань:			
из кварцевого волокна ($d = 6 \div$ $\div$ 8 мкм, толщина слоя 0,4 мм, γ = = 0,34 кг/м²)	—	200··· ···600···1000	120··· ···180···290
углеродная графитированная (аргон, d = = 5 мкм, толщина слоя 0,45 мм, γ = =0,33 кг/м²)	—	200··· ···1000··· ···1800	130··· ···270···460
Шелк	0,10	0	40
Эбонит [22]	1,2	20	160
Эбонит вспученный	0,064	—100···20	19···32
Экранная теплоизоляция:			
алюминизированная с одной стороны лавсановая пленка толщиной 5—12 мкм с рифлением 3× ×3 мм и стекловуаль ЭВТИ-7 (15 экранов на 1 см, p= 10^{-3}Па)	0,022	$-200<t<$ <20	0,1
ниобиевая фольга толщиной 15 мкм с рифлением в виде шаровых сегментов высотой 0,05—0,1 мм (20 экранов на 1 см, вакуум)	—	800··· ···1000··· ···1200	42···77··· ···130

Продолжение табл. 15.28

*¹ Теплопроводности немонолитных материалов приведены для воздуха при давлении $1{,}01\cdot10^5$ Па, если среда и давление не указаны явно.

*² Белая мягкая пена карбомидных смол.

Обозначения: d — диаметр волокон, зерен, пор; p — давление газа; $П$ — пористость.

Таблица 15. 29. **Теплопроводности горных пород, Вт/(м·К) [63]**

Порода	$\lambda_{ср}$	λ_{min}—λ_{max}
Осадочные породы		
Аргиллит, глинистый сланец	1,3	0,25—3,1
Глина	1,6	0,12—3,1
Доломит	3,2	1,6—6,5
Известняк	2,3	0,64—4,4
Каменная соль	3,6	1,7—5,5
Мел	1,6	0,82—2,2
Песчаник	1,8	0,24—4,4
Торф	0,07	—
Уголь	0,45	0,13—2,2
Ил, глина, песок	0,84	0,61—2,1
Магматические породы		
Базальт	1,3	0,44—3,5
Гранит	2,4	1,1—3,9
Диабаз	2,5	1,7—3,3
Лава	0,49	0,25—0,73
Обсидиан	1,5	1,4—1,6
Туф	2,3	1,3—4,0
Метаморфические породы		
Гнейс	2,0	0,94—4,9
Кварцит	5,3	2,7—7,6
Мрамор	2,6	1,6—4,0
Сланец	2,3	0,65—4,8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Карслоу Г., Егер Д.** Теплопроводность твердых тел. — 2-е изд.: Пер. с англ./Под ред. А. А. Померанцева. М: Наука, 1964.

2. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.

3. **Thermal** conductivity/Ed. R. P. Tye. Lond.: Acad. Press Inc. 1969. Vol. 1, 2.

4. **Ho C. Y., Powell R. W., Liley P. E.**//J Phys. Chem. Ref. Data. 1972. Vol. 1. № 2. P. 279—425.

5. **Ho C. Y., Powell R. W., Liley P. E.**//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1974. Vol. 3. Suppl. № 1.

6. **Теплопроводность** жидкостей и газов: Справочные данные. ГСССД/Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий. М.: Изд-во стандартов. 1978.

7. **Теплопроводность** твердых тел: Справочник/ А. С. Охотин, Р. П. Боровикова, Т. В. Нечаева, А. С. Пушкарский; Под ред. А. С. Охотина. М.: Энергоатомиздат, 1984.

8. **Childs G. E., Hanley H. J. M.**//Cryogenics. 1968. Vol 8, № 2. P. 94—97.

9. **Гиршфельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р.** Молекулярная теория газов и жидкостей: Пер. с англ./Под ред. Е. В. Ступоченко. М.: Изд-во иностр. лит., 1961.

10. **Ферцигер Дж., Капер Г.** Математическая теория процессов переноса в газах: Пер. с англ./Под ред. Д. Н. Зуборева и А. Г. Башкирова. М.: Мир, 1976.

11. **Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.** Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. — 3-е изд.: Пер. с англ./Под ред. Б. И. Соколова. Л.: Химия, 1982.

12. **Коган М. Н.** Динамика разреженного газа. Кинетическая теория. М.: Наука, 1967.

13. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей..— 2-е изд. М.: Наука, 1972.

14. **Теплопроводность** многоатомных жидкостей и газов: Обзорная информация/Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий. М.: Изд-во стандартов, 1981.

15. **Миснар А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций: Пер. с фр. М.: Мир, 1968.

16. **Филиппов Л. П.** Исследование теплопроводности жидкостей. М.: Изд-во МГУ, 1970.

17. **Займан Дж.** Электроны и фононы. Теория явлений переноса в твердых телах: Пер. с англ./Под ред. В. Л. Бонч-Бруевича. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.

18. **Берман Р.** Теплопроводность твердых тел: Пер. с англ./Под ред. В. З. Кресина. М.: Мир, 1979.

19. **Могилевский Б. М., Чудновский А. Ф.** Теплопроводность полупроводников. М.: Наука, 1972.

20. **Anderson A. C.**//Amorphous solids. Low-temperature properties/Ed. W. A. Phillips. Berlin: Springer Verlag, 1981. S. 65—78.

21. **Ross R. G., Andersson P., Sundqvist B., Bäckström G.**//Rep. Progr. Phys. 1984 Vol. 47. P. 1347—1402.

22. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат, 1968.

23. **Чиркин В. С.** Теплопроводность промышленных материалов. — 2-е изд.. М.: Машгиз, 1962.

24. **Кожевников И .Г., Новицкий Л. А.** Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник — 2-е изд. М.: Машиностроение, 1982.

25. **Childs G. B., Ericks L. Y., Powell R. W.** Thermal conductivity of solids at room temperature and below. A review and compilation of the literature/NBS (US) Monogr. 131, 1973.

26 **Зиновьев В. Е., Коршунов И. Г.** Теплопроводность и температуропроводность переходных металлов при высоких температурах. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. ТФЦ. М.: ИВТ АН СССР. Ч. 1. 1978. № 1. С. 3—121; Ч. 2. 1979. № 4. С. 3—119.

27. **Зиновьев В. Е.** Кинетические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. М.: Металлургия, 1984.

28. **Фегер А., Янош Ш., Петрович П. и др.**//Физика низких температур. 1978. Т. 4, № 10. С. 1305—1315.

29.. **Chuah D. G. C., Ratnalingam R.**//J. Low Temp. Phys. 1974. Vol. 14, № 3/4. P. 257—276.

30. **Алиев Н. Н., Волькенштейн Н. В.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1965. Т 49, вып. 5(11). С. 1450—1452.

31. **Cook J. G., van der Meer M. P., Laubitz M. J.**// Canad. J. Phys. 1972. Vol. 50, № 12. P. 1386—1401.

32. **Campos Tome M. A.**//J. Low Temp. Phys. 1975. Vol. 20, № 5/6. P. 677—689.

33. **Andrew J. F., Klemens P. G.** Thermal conductivity and Lorenz number of plutonium and plutonium-gallium alloys//Proc. 17th Intern. Thermal Conductivity Conf./Ed. J. G. Hust. N. Y.: Plenum Press. 1983. P. 209—218.

34. **Ведерников М. В., Кижаев С. А., Петров А. В. и др.**//Физика твердого тела. 1975. Т. 17, вып. 1. С. 340—342.

35. **Амасович Е. С., Пелецкий В. З.**//Теплофизика высоких температур. 1982. Т. 20, № 5. С. 891—896.

36. **Справочник** металлиста. — 2-е изд./Под ред. Н. С. Ачеркана. М : Машиностроение, 1965. Т. 1.

37. **Геллер Ю. А.** Инструментальные стали М: Металлургия, 1975.

38. **Жданович В. А., Чашкин Ю. Р.**//Измерительная техника. 1976. № 3. С. 28—31.

39. **Сергеев О. А.**//Теплофизические свойства веществ и материалов. М.: Изд-во стандартов. 1979. Вып. 13. С. 133—137.

40. **Материалы** в приборостроении и автоматике: Справочник/Под ред. Ю. М. Пятина. М.: Машиностроение. 1969.

41. **Рогельберг И. Л., Бейлин В. М.** Сплавы для термопар: Справочник. М.: Металлургия, 1983.

42. **White G. K.** Experimental techniques in low-temperature physics. — 3d ed. Oxford: Clarendon Press, 1979.

43. **Алюминиевые** сплавы: Справочное руководство. М.: Металлургия, 1972.

44. **Глазунов С .Г., Моисеев В. Н.** Конструкционные титановые сплавы. М : Металлургия, 1974.

45. **Смирягин А. П., Смирягина М. А., Белова А. В.** Промышленные цветные металлы и сплавы. — 3-е изд. М.: Металлургия, 1974.

46. **Справочник** металлиста. — 3-е изд./Под ред. А. Г. Рахштадта и В. А. Бромстрема. М.: Машиностроение, 1976. Т. 2.

47. **Cody G. D., Cohen R. W.**//Rev. Mod. Phys. 1964. Vol. 362, № 1 (part 1). P. 121—123.

48. **Slack G. A.**//Phys. Rev. 1972. Vol. B6, № 10. P. 3791—3800.

49. **Whitsett C. R., Nelson D. A., Broerman J. G. et al.** //Phys. Rev. 1973. Vol. B7, № 10. P. 4625—4640.

50. **Slack G. A.**//J. Phys. Chem. Solids. 1973. Vol. 34, № 2. P. 321—335.

51. **Slack G. A., Austerman S. B.**//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42, № 12. P. 4713—4717.

52. **Jackson H. E., Walker C. T.**//Phys. Rev. 1971. Vol. B3, № 4. P. 1428—1439.

53. **Новицкий Л. А., Кожевников И. Г.** Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1975.

54. **Сергеев О. А., Шашков А. Г., Уманский А. С.**// Инженерно-физический журнал. 1982. Т. 43, № 6. С. 960—970.

55. **Шадричев Е. В., Смирнов И. А.**//Приборы и техника эксперимента. 1968. № 5. С. 218—219.

56. **Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю.** Теплофизи-

ческие свойства неметаллических материалов. (Карбиды): Справочная книга. Л.: Энергия, 1977.

57. **Литовский Е. Я., Пучкелевич Н. А.** Теплофизические свойства огнеупоров: Справочник. М.: Металлургия, 1982.

58. **Кржижановский Р. Е., Штерн З. Ю.** Теплофизические свойства неметаллических материалов (Окислы): Справочная книга. Л.: Энергия, 1973.

59. **Fink J. K., Chazanov M. G., Leibovitz L.**//J. Nucl. Mater. 1981. Vol. 102. J. 17—25.

60. **Тепловая** изоляция: Справочник строителя. — 4-е изд./Г. Ф. Кузнецов, В. И. Бельский, В. П. Горбачев и др.; Под ред. Г. Ф. Кузнецова. М.: Стройиздат, 1985.

61. **Харламов А. Г.** Теплопроводность высокотемпературных теплоизоляторов. М.: Атомиздат, 1980.

62. **Powell R. L., Childs G. E.**//American Institute of Physics Handbook. — 3d ed. N. Y.: McGraw-Hill, 1972. Ch. 4g.

63. **Физические** свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика. — 2-е изд./Под ред. Н. Б. Дортман. М.: Недра, 1984.

ГЛАВА 16

ВЯЗКОСТЬ

А. В. Елецкий

16.1. ВВЕДЕНИЕ

Вязкость текучих тел η_{xy} определяется соотношением Ньютона

$$F_x = -\eta_{xy}\nabla v_y, \qquad (16.1)$$

связывающим силу внутреннего трения F_x, которая действует на единичную площадку в направлении, противоположном градиенту скорости течения вязкого вещества (газа, жидкости), с градиентом скорости ∇v_y. Если рассматриваемый объем, заполненный текучим веществом, не имеет выделенных направлений, которые могут быть обусловлены либо наличием внешних полей, либо преимущественной ориентацией частиц вещества, все компоненты тензора вязкости равны друг другу и вязкость является скаляром. Именно такой случай мы и будем рассматривать в дальнейшем.

Иногда коэффициент η называют динамической вязкостью, отличая его от коэффициента $\nu=\eta/\rho$ (ρ — плотность вещества), называемого кинематической вязкостью. Единица динамической вязкости в СИ—Па·с=Н·с/м^2= =кг/(м·с), кинематической вязкости — м^2/с.

16.2. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ

В широком диапазоне изменения давления газа вязкость газа определяется парными соударениями составляющих его частиц. Нижняя граница этого диапазона определяется условием, согласно которому характерная длина пробега частиц газа много меньше размеров рассматриваемой емкости с газом. В случае, если размер емкости ~10 см, указанная граница соответствует давлению ~1 Па (10^{-2} мм рт. ст.). Верхняя граница определяется условием идеальности газа, согласно которому длина свободного пробега частиц много больше среднего расстояния между ними $n^{-1/3}$. Указанное условие, при выполнении которого роль тройных и других множественных столкновительных процессов по сравнению с процессами парных соударений несущественна, может быть выражено в виде

$$n \ll \sigma^{-3/2}$$

(σ — сечение рассеяния частиц). Это условие ограничивает давление значением порядка нескольких десятков мегапаскалей (нескольких сотен атмосфер). Кроме того, условие идеальности газа зависит от температуры и может существенно нарушаться при приближении к тройной точке.

Согласно элементарной кинетической теории газов выражение для вязкости газа, моделируемого шариками с не зависящим от скорости сеченнем соударения, имеет вид

$$\eta = \frac{1}{3}\,\frac{m\langle v\rangle}{\sigma}, \qquad (16.2)$$

где m — масса частицы газа; $\langle v\rangle \approx \sqrt{2kT/m}$ — средняя тепловая скорость; σ — сечение рассеяния. В реальной ситуации сечение рассеяния атомов и молекул зависит от скорости (обычно убывает с ростом скорости). В этом случае выражение для вязкости, определяемое на основании решения кинетического уравнения Больцмана, имеет значительно более сложный вид, тем не менее из этого выражения, так же как и из элементарной теории (16.2), следует, что вязкость в широком диапазоне изменения давления практически от давления не зависит* и возрастает с температурой более резко, чем по закону $T^{1/2}$.

В табл. 16.1, 16.2 приведены значения вязкости газообразных веществ. Эти значения получены в результате усреднения большого количества экспериментальных данных и соответствуют условиям, когда изменение давления газа не приводит к изменению вязкости в пределах погрешности эксперимента (0,1—1%). Такая ситуация имеет место при давлениях ниже атмосферного. Характер зависимости вязкости от давления виден из табл. 16.3, 16.4, где приведены значения вязкости азота и водорода при различных температуре и давлении [2]. Погрешность данных, приведенных в табл. 16.1—16.4, не превышает нескольких процентов.

Вязкость смеси двух газов может немонотонным образом зависеть от ее парциального состава. Это следует как из прямых экспериментов, так и из результатов кинетической теории [3]. Немонотонность проявляется, в частности, в зависимости вязкости частично диссоциированных молекулярных газов от температуры и давления. Изменение температуры и давления газа вызывает изменение степени его диссоциации, т. е. парциального состава, а это в свою очередь сказывается на значении вязкости. В табл. 16.5—16.10 приведены значения вязкости наиболее широко распространенных молекулярных газов при различных давлении и температуре в условиях, когда газ является частично диссоциированным. В табл. 16.11—16.14 приведены значения вязкости некоторых бинарных газовых смесей при различных температуре и парциальном составе. Погрешность приведенных данных — порядка 1%. В табл. 16.15 представлены значения вязкости частично диссоциированного воздуха.

* Зависимость вязкости от давления возникает при наличии в газе процессов ассоциации, изменяющих число частиц в системе.

Таблица 16.1. **Вязкость газов при атмосферном давлении и различной температуре, 10^{-6} Па·с (погрешность данных 1—10%) [1, 2, 4]**

T, К	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H_2	D_2	N_2	O_2	F_2	Cl_2
60	7,06	9,63	5,34	—	—	2,91	3,86	—	—	—	—
80	8,41	12,1	6,83	—	—	3,60	4,88	5,59	6,27	—	—
100	9,63	14,4	8,34	9,29	—	4,21	5,79	6,87	7,68	8,56	—
150	12,3	19,4	12,3	13,4	12,2	5,57	7,77	10,0	11,3	12,9	—
200	15,0	23,9	16,0	17,6	15,8	6,78	9,55	12,9	14,6	16,8	—
250	17,5	28,0	19,5	21,6	19,6	7,90	11,2	15,5	17,8	20,3	—
300	19,9	31,7	22,7	25,5	23,3	8,94	12,7	17,9	20,7	23,6	13,7
400	24,3	38,4	28,5	32,7	30,4	10,9	15,5	22,1	25,9	29,5	18,0
500	28,3	44,5	33,6	39,1	36,8	12,7	18,0	25,9	30,5	34,8	22,1
600	32,0	50,0	38,3	45,0	42,9	14,5	—	29,3	34,7	—	25,8
800	38,8	60,0	46,4	55,4	53,7	17,7	—	35,2	42,1	—	32,6
1000	45,0	68,9	53,5	64,5	63,2	20,7	—	40,4	48,5	—	—
1500	58,6	—	68,4	83,6	83,3	27,6	—	—	61,9	—	—
2000	70,7	—	80,7	—	—	33,6	—	—	73,1	—	—
2200	74,2	—	85,1	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 16.1

T, К	CO	CO_2	H_2S	COS	CS_2	HCN	C_2N_2	SiH_4	Воздух	PH_3	CCl_4
60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	5,40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	6,70	—	—	—	—	—	—	—	7,11	—	—
150	9,84	—	—	—	—	—	—	—	10,3	—	—
200	12,7	10,2	—	—	—	—	—	—	13,2	—	—
250	15,4	12,6	—	—	—	—	—	—	16,0	—	—
300	17,8	15,0	13,0	12,5	10,1	7,58	10,2	11,7	18,5	11,8	9,9
400	22,1	19,5	17,3	16,6	13,6	10,8	13,7	15,3	23,0	15,6	13,0
500	25,9	23,6	—	20,4	16,9	13,9	—	18,9	27,0	19,1	16,0
600	29,4	33,9	—	—	20,2	—	—	—	30,6	—	19,0
800	35,4	39,5	—	—	—	—	—	—	37,0	—	—
1000	40,6	—	—	—	—	—	—	—	42,4	—	—
1500	51,6	—	—	—	—	—	—	—	53	—	
2000	—	—	—	—	—	—	—	—	63	—	—
2200	—	—	—	—	—	—	—	—	67	—	—

Продолжение табл. 16.1

T, К	Br_2	T_2	NH_3	BF_3	HCl	HI	H_2S	NO	NO_2	N_2O	SO_2	H_2O
60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
150	—	—	—	—	—	—	—	10,5	—	—	—	—
200	—	—	6,89	12,1	—	—	—	13,6	—	10,0	8,62	—
250	—	—	8,53	14,6	12,1	15,9	—	16,6	—	12,6	10,8	—
300	15,5	—	10,3	17,1	14,6	19,0	12,6	19,3	13,0	15,0	13,0	9,13
400	20,3	18,6	13,9	21,7	19,6	25,1	16,9	24,1	21,3	19,5	17,3	13,2
500	25,1	23,0	17,6	26,1	24,3	31,0	20,8	28,4	—	23,6	21,3	17,3
600	29,9	27,2	21,4	30,2	28,8	36,7	—	32,3	—	27,3	25,1	21,3
800	39,2	—	28,8	—	—	—	—	39,0	—	34,1	32,1	29,5
1000	—	—	35,9	—	—	—	—	44,9	—	40,0	38,4	37,6
1500	—	—	—	—	—	—	—	57,3	—	52,5	—	—
2000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 16.2. **Вязкость газообразных углеводородов и их производных при атмосферном давлении, 10^{-6} Па·с [1, 2]**

Газ	Температура T, К							
	200	250	300	400	500	600	800	1000
Ацетон C_3H_6O	—	6,78	7,77	10,1	12,8	15,5	—	—
Ацетилен C_2H_2	—	—	10,3	13,5	16,4	19,1	—	—
Бензол C_6H_6	—	—	7,65	10,2	12,7	15,1	—	—
Бромметан CH_3Br	—	13,2	15,8	20,2	24,3	—	—	—
изо-Бутан *изо*-C_4H_{10}	—	—	7,60	10,0	12,3	14,0	17,5	—
н-Бутан *н*-C_4H_{10}	—	—	7,57	9,96	12,3	14,5	18,2	—
Тетрахлорметан CCl_4	—	—	9,97	13,2	16,1	18,8	23,7	—
Тетрафторметан CF_4	—	14,9	17,5	22,1	26,2	—	—	—
Пентафторхлорэтан C_2F_5Cl	—	—	12,8	16,5	20,0	—	—	—
Трифторхлорметан CF_3Cl	—	12,4	14,5	18,9	23,4	—	—	—
Дифтордихлорметан CF_2Cl_2	—	10,6	12,6	16,4	19,8	—	—	—
Дихлорфторметан $CHCl_2F$	—	—	11,6	15,3	18,8	—	—	—
Дихлортетрафторэтан $C_2Cl_2F_4$	—	10,0	11,6	15,0	18,4	—	—	—
Этан C_2H_6	6,43	7,96	9,45	12,2	14,8	17,2	21,4	25,1
Этанол C_2H_5OH	—	—	9,0	11,8	14,1	16,9	—	—
Этилен C_2H_4	7,1	8,8	10,4	13,5	16,3	18,8	23,4	27,5
Диэтилэфир $C_4H_{10}O$	—	6,3	7,6	10,1	12,5	14,7	—	—
н-Гептан *н*-C_7H_{16}	—	—	6,1	7,9	9,8	11,6	—	—
н-Гексан *н*-C_6H_{14}	—	—	6,7	8,7	10,8	12,8	16,5	19,6
Метан CH_4	7,76	9,53	11,2	14,2	17,0	19,4	23,8	27,6
Метанол CH_3OH	—	8,3	9,9	13,1	16,5	19,8	—	—
Хлорметан CH_3Cl	—	9,29	11,0	14,5	17,9	21,3	—	—
н-Октан *н*-C_8H_{18}	—	—	—	7,40	9,2	10,9	—	—
изо-Пентан *изо*-C_5H_{12}	—	—	—	9,60	12,0	14,3	16,8	—
н-Пентан *н*-C_5H_{12}	—	—	—	9,23	11,4	13,4	16,8	—
н-Пропан *н*-C_3H_8	—	—	8,25	10,8	13,3	15,6	—	—
Пропилен C_3H_6	—	7,28	8,78	11,5	14,1	16,5	—	—
Пропан C_3H_8	—	7,1	8,3	9,48	11,7	5,2	17,1	—
Трихлорфторметан CCl_3F	—	9,42	11,0	14,3	17,8	—	—	—
Трихлортрифторэтан $C_2Cl_3F_3$	—	9,13	10,4	12,5	—	—	—	—
Трифторметан CHF_3	—	12,4	14,9	19,6	23,8	—	—	—
Бромтрифторметан $CBrF_3$	—	—	15,0	19,8	—	—	—	—
изо-Пропанол *изо*-C_3H_8O	—	—	—	—	13,1	—	—	—
н-Пропанол *н*-C_3H_8O	—	—	—	10,6	13,2	—	—	—

Таблица 16.3. **Вязкость газообразного азота при различных температуре и давлении, 10^{-6} Па·с [3]**

T, К	Давление, 10^5 Па						
	1	10	50	100	150	200	400
80	5,52	—	—	—	—	—	—
100	6,88	—	—	—	—	—	—
120	8,21	8,68	—	—	—	—	—
140	9,45	9,83	15,5	—	—	—	—
160	10,6	11,0	13,4	22,1	31,3	38,4	59,0
180	11,8	12,1	13,8	18,3	24,5	30,4	49,0
200	12,9	13,1	14,5	17,5	21,7	26,2	42,3
250	15,5	15,7	16,6	18,2	20,4	22,7	33,5
300	17,8	18,0	18,7	19,8	21,3	22,9	30,4
400	22,0	22,2	22,7	23,4	24,2	25,2	29,6
500	25,8	25,9	26,3	26,8	27,4	28,1	31,1
600	29,1	29,2	29,5	29,9	30,4	30,9	33,2
700	32,1	32,2	32,4	32,8	33,2	33,6	35,5
800	34,9	35,0	35,2	35,5	35,8	36,2	37,8
900	37,5	37,6	37,8	38,1	38,4	38,6	40,0
1000	40,0	40,0	40,2	40,5	40,7	41,0	41,6
1100	42,3	42,4	42,5	42,8	43,0	43,2	44,3
1200	44,5	44,6	44,7	44,9	45,1	45,4	46,3
1300	46,6	46,7	46,8	47,0	47,2	47,4	48,2

Таблица 16.4. **Вязкость газообразного водорода при различных давлении и температуре, 10^{-6} Па·с [3]**

T, К	Давление, 10^5 Ма					
	1	10	20	50	100	500
30	1,6	—	—	—	—	—
50	2.49	2,54	2,80	4,20	6,25	17,4
100	4,21	4,23	4,24	4,42	5,0	9,95
200	6,81	6,82	6,85	6,91	7,06	9.13
300	8,96	8,96	8,98	9,02	9,10	10,3
500	12,6	12,6	12,6	12,7	12,7	13,3
750	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	17,0
1000	20,1	20,1	20,1	20,2	20,2	20,4

Таблица 16.5. **Вязкость частично диссоциированного водорода, 10^{-6} Па·с [3]**

T, 10^3 К	Давление, Па						
	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	$2\cdot10^7$
1,8	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29,6
2,0	32,0	31,9	31,8	31,8	31,8	31,8	31,8
2,2	34,8	24,4	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2
2,4	37,3	37,2	36,8	36,6	36,6	36,6	36,6
2,6	37,7	40,0	39,6	39,2	39,0	39,0	39,0
2,8	34,2	37,6	42,1	42,3	41,8	41,5	41,5
3,0	36,8	41,3	44,9	44,7	44,2	44,0	43,9
3,2	38,1	40,7	46,4	47,6	46,9	46,5	46,4
3,4	39,6	41,1	46,4	50,1	49,7	49,1	50,0
3,6	41,7	42,3	46,0	51,9	52,4	51,7	51,5
3,8	43,5	43,8	46,0	52,7	55,1	54,4	54,1
4,0	45,3	45,4	46,7	52,7	57,5	57,1	56,8
4,2	47,1	47,2	47,9	52,6	59,3	59,8	59,5
4,4	48,9	48,9	49,4	52,7	60,5	62,5	62,2
4,6	50,6	50,6	50,9	53,2	61,1	65,0	64,9
4,8	52,4	52,4	52,6	54,1	61,4	67,3	67,4
5,0	54,1	54,1	54,3	55,3	61,5	69,2	69,8
5,2	55,9	55,9	56,0	56,7	61,8	70,9	72,0
5,4	57,7	57,7	57,7	58,3	62,3	72,1	73,9
5,6	59,5	59,5	59,6	59,9	63,1	74,0	75,5
5,8	61,4	61,4	61,4	61,7	64,1	73,8	76,8
6,0	63,3	63,3	63,3	63,5	65,4	74,5	77,4

Таблица 16.6. **Вязкость частично диссоциированного водяного пара, 10^{-5} Па·с [3]**

T, 10^3 К	Давление, 10^5 Па							
	0,1	0,4	1,0	5,0	20	40	60	100
1,8	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12
2,0	6,57	6,58	6,59	6,59	6,60	6,60	6,60	6,60
2,2	6,98	7,02	7,03	7,04	7,05	7,06	7,06	7,06
2,4	7,31	7,39	7,42	7,46	7,49	7,49	7,50	7,50
2,6	7,52	7,67	7,75	7,84	7,89	7,90	7,91	7,92
2,8	7,54	7,84	7,98	8,15	8,24	8,28	8,29	8,31
3,0	7,56	7,90	8,10	8,38	8,54	8,60	8,63	8,65
3,2	7,63	7,78	8,14	8,52	8,77	8,86	8,91	8,96
3,4	7,95	7,96	8,16	8,59	8,93	9,06	9,13	9,21
3,6	8,44	8,22	8,25	8,63	9,03	9,20	9,30	9,41
3,8	9,03	8,67	8,51	8,68	9,08	9,29	9,41	9,55
4,0	9,53	9,22	8,95	8,82	9,14	9,36	9,49	9,65
4,2	9,97	9,76	9,49	9,09	9,22	9,42	9,55	9,73
4,4	10,3	10,2	10,0	9,50	9,39	9,52	9,63	9,80
4,6	10,8	10,7	10,6	9,99	9,65	9,68	9,75	9,89
4,8	11,2	11,1	11,0	10,6	10,0	9,93	9,94	10,0
5,0	11,6	11,6	11,4	11,0	10,4	10,2	10,2	10,2
5,2	11,9	11,9	11,8	11,6	10,9	10,7	10,6	10,5
5,4	12,3	12,2	12,2	12,0	11,5	11,2	11,0	10,8
5,6	12,6	12,6	12,6	12,4	12,0	11,6	11,4	11,2
5,8	13,0	13,0	13,0	12,8	12,5	12,2	12,0	11,7
6,0	13,4	13,4	13,4	13,2	13,0	12,6	12,4	12,2

Таблица 16.7. **Вязкость частично диссоциированной двуокиси углерода CO_2, 10^{-6} Па·с [3]**

T, 10^3 К	Давление, Па		
	10^3	10^5	10^7
1,6	56,4	56,4	56,4
1,8	61,5	61,4	61,4
2,0	66,7	66,3	66,2
2,2	74,3	71,2	70,9
2,4	79,0	76,2	75,5
2,6	86,6	81,7	80,2
2,8	94,2	87,9	84,9
3,0	101	94,8	89,9
3,2	106	102	95,2
3,4	111	109	101
3,6	116	116	107
3,8	122	122	113
4,0	127	128	120

Таблица 16.8. **Вязкость частично диссоциированного азота, 10^{-6} Па·с [3]**

T, 10^3 К	Давление, Па					
	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
3,6	106	106	106	106	106	106
3,8	111	111	111	111	111	111
4,0	116	115	115	115	115	115
4,2	120	120	120	120	120	120
4,4	125	125	124	124	124	124
4,6	130	129	129	129	129	129
4,8	136	134	134	134	134	134
5,0	142	139	138	138	138	138
5,2	149	144	143	143	143	143
5,4	155	149	147	147	147	147
5,6	162	155	152	152	152	152
5,8	167	162	157	156	156	156
6,0	172	168	162	161	161	161

Таблица 16.9. **Вязкость частично диссоциированного кислорода, 10^{-6} Па·с [3]**

T, 10^3 К	Давление, Па					
	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
2,0	73,7	73,6	73,5	73,5	73,5	73,5
2,2	79,1	78,6	78,4	78,3	78,3	78,3
2,4	85,9	84,0	83,3	83,0	82,9	82,9
2,6	93,9	90,6	88,6	87,8	87,6	87,5
2,8	100	98,6	94,8	92,0	92,2	92,0
3,0	104	106	102	98,6	97,0	96,5
3,2	108	111	111	105	102	101
3,4	112	114	118	113	108	106
3,6	117	118	122	121	115	111
3,8	122	123	126	129	122	116
4,0	127	127	129	135	130	133
4,2	132	132	133	139	138	129
4,4	139	137	138	142	146	136
4,6	142	142	142	145	152	145
4,8	146	146	147	149	156	153

Продолжение табл. 16.9

T, 10^3 К	Давление, Па					
	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
5,0	151	151	151	153	160	161
5,2	156	156	156	157	163	168
5,4	160	160	160	161	166	174
5,6	165	165	165	166	170	180
5,8	170	170	170	170	173	184
6,0	174	174	174	174	177	188

Таблица 16.10. **Вязкость частично диссоциированного фтора, 10^{-6} Па·с [3]**

T, 10^3 К	Давление, Па		
	10^3	10^5	10^7
1,0	58,7	57,8	57,5
1,2	71,6	67,4	65,8
1,4	85,7	79,6	75,0
1,6	95,5	92,1	85,5
1,8	104	102	95,6
2,0	114	114	109
2,2	122	127	120
2,4	130	130	128
2,6	137	137	137
2,8	143	143	143
3,0	152	152	152
4,0	185	185	185
5,0	217	217	217
6,0	247	247	247

Таблица 16.11. **Вязкость смеси Ar — He при атмосферном давлении, различных значениях температуры и молярной доли Ar, 10^{-6} Па·с [1]**

Молярная доля Ar	Температура, К								
	72,0	90,2	192,5	229,5	293	373	456	473	523
0	7,98	9,12	14,5	16,4	19,7	23,2	16,9	27,2	29,0
0,05	8,23	9,40	15,4	17,6	20,6	23,8	28,3	27,8	29,8
0,10	8,34	9,60	16,0	17,9	21,3	24,4	29,2	28,4	30,6
0,15	8,37	9,70	16,4	18,4	21,8	25,0	29,9	29,0	31,4
0,20	8,37	9,74	16,6	18,8	22,2	25,6	30,5	29,5	32,1
0,25	8,32	9,70	16,8	19,0	22,5	26,0	31,0	30,0	32,7
0,30	8,24	9,60	16,2	19,2	22,7	26,4	31,3	31,4	33,2
0,35	8,13	9,47	16,9	19,2	22,8	26,8	31,6	31,8	33,6
0,40	8,00	9,32	16,8	19,1	22,9	27,0	31,9	32,2	34,0
0,45	7,85	9,17	16,7	19,0	22,9	27,2	32,1	31,4	34,3
0,50	7,70	9,03	16,6	18,9	23,0	27,4	32,2	31,7	34,5
0,55	7,54	8,90	16,4	18,8	23,0	27,5	32,4	31,9	34,7
0,60	7,40	8,76	16,3	18,8	22,9	27,5	32,4	32,0	34,8
0,65	7,24	8,63	16,2	18,7	22,9	27,5	32,5	32,1	34,9
0,70	7,09	8,49	16,1	18,6	22,8	27,5	32,5	32,2	35,0
0,75	6,95	8,35	16,0	18,5	22,7	27,4	32,5	32,2	35,0
0,80	6,82	8,21	15,9	18,3	22,6	27,3	32,5	32,2	34,9
0,85	6,70	8,07	15,8	18,2	22,5	27,2	32,4	32,2	34,8
0,90	6,57	7,93	15,7	18,0	22,4	27,1	32,4	32,2	34,8
0,95	6,50	7,80	15,6	17,9	22,3	27,0	32,4	32,1	34,6
1,00	6,35	7,68	15,5	17,7	22,1	26,8	32,3	32,1	34,5

Таблица 16.12. **Вязкость смеси Ar — Ne при атмосферном давлении, различных значениях температуры и молярной доли Ar, 10^{-6} Па·с [1]**

Молярная доля Ar	Температура, К							
	72,3	90,3	193,4	229	293	373	473	523
0	11,7	13,5	23,5	26,7	30,9	36,2	42,2	45,0
0,05	11,4	13,1	23,0	26,2	30,4	35,6	41,6	44,3
0,10	11,0	12,8	22,4	25,6	29,8	35,1	41,0	43,6
0,15	10,6	12,4	21,9	25,1	29,3	34,4	40,3	43,0
0,20	10,3	12,0	21,4	24,6	28,8	33,9	39,7	42,4
0,25	10,0	11,7	20,9	24,1	28,3	33,4	39,1	41,7
0,30	9,66	11,3	20,4	23,6	27,8	32,8	38,6	41,1
0,35	9,35	11,0	20,0	23,2	27,3	32,3	38,0	40,6

Продолжение табл. 16.12

Молярная доля Ar	Температура, K							
	72,3	90,3	193,4	229	293	373	473	523
0,40	9,06	10,7	19,5	22,7	26,8	31,8	37,4	40,0
0,45	8,80	10,4	19,1	22,3	26,4	31,3	36,9	39,5
0,50	8,53	10,1	18,7	21,8	25,9	30,8	36,4	38,9
0,55	8,28	9,83	18,3	21,4	25,5	30,4	35,9	38,4
0,60	7,03	9,57	17,9	21,0	25,1	30,0	35,4	37,9
0,65	7,80	9,32	17,3	20,6	24,7	29,6	34,9	37,4
0,70	7,56	9,10	17,1	20,2	24,4	29,2	34,5	37,0
0,75	7,34	8,87	16,8	19,8	23,9	28,8	34,1	36,6
0,80	7,12	8,65	16,5	19,4	23,6	28,5	33,7	36,2
0,85	6,92	8,44	16,2	19,0	23,2	28,1	33,3	35,8
0,90	6,74	8,21	15,9	18,7	22,9	27,7	32,9	35,4
0,95	6,56	8,00	15,6	18,3	22,5	27,3	32,6	35,0
1,00	6,38	7,75	15,3	18,0	22,1	26,9	32,2	34,6

Таблица 16.13. **Вязкость смеси Ar — H_2 при атмосферном давлении, различных значениях температуры и молярной доли Ar, 10^{-6} Па·с [1]**

Молярная доля Ar	Температура, K			
	293	373	472	523
0,00	8,75	10,3	12,1	13,0
0,05	9,08	12,8	15,3	16,4
0,10	13,0	15,0	18,1	19,5
0,15	14,6	17,2	20,5	22,1
0,20	16,0	18,9	22,5	24,2
0,25	17,0	20,3	24,0	25,8
0,30	17,9	21,5	25,4	27,2
0,35	18,6	22,4	26,4	28,4
0,40	19,2	23,2	27,4	29,4
0,45	19,7	23,9	28,2	30,2
0,50	20,2	24,5	28,9	30,9
0,55	20,4	24,9	29,4	31,6
0,60	20,9	25,3	29,9	32,2
0,65	21,8	25,6	30,3	32,7
0,70	21,4	25,9	30,7	33,1
0,75	21,6	26,2	30,9	33,4
0,80	21,7	26,3	31,2	33,7
0,85	21,8	26,5	31,5	33,9
0,90	22,0	26,6	31,7	34,2
0,95	22,1	26,8	31,9	34,3
1,00	22,1	26,8	32,1	34,5

Таблица 16.14. **Вязкость смеси CO_2 — H_2 при атмосферном давлении, различных температуре и молярной доле CO_2, 10^{-6} Па·с [1]**

Молярная доля CO_2	Температура, K			
	300	400	500	550
0	8,9	10,8	12,6	13,4
0,05	10,9	13,4	15,4	16,9
0,10	12,1	15,0	17,4	18,7
0,15	12,9	16,1	19,0	20,1
0,20	13,6	16,9	20,0	21,4
0,25	14,0	17,6	20,8	21,6
0,30	14,3	18,1	21,5	23,4
0,35	14,6	18,5	22,0	24,0

Продолжение табл. 16.14

Молярная доля CO_2	Температура, K			
	300	400	500	550
0,40	14,8	18,8	22,4	24,4
0,45	14,9	19,0	22,7	24,7
0,50	15,0	19,2	22,9	24,9
0,55	15,0	19,3	23,1	25,1
0,60	15,1	19,4	23,3	25,2
0,65	15,1	19,4	23,4	25,3
0,70	15,1	19,5	23,5	25,4
0,75	15,0	19,5	23,6	25,4
0,80	15,0	19,5	23,6	25,4
0,85	15,0	19,5	23,6	25,5
0,90	15,0	19,5	23,6	25,5
0,95	15,0	19,5	23,6	25,5
1,00	14,9	19,4	23,5	25,6

Таблица 16.15. **Вязкость частично диссоциированного воздуха, 10^{-6} Па·с [3]**

T, 10^3 K	Давление, 10^5 Па			
	0,001	1	10	100
1,5	55,7	55,7	55,7	55,7
1,6	58,4	58,4	58,4	58,4
1,7	61,1	61,1	61,1	61,1
1,8	63,7	63,7	63,7	63,7
1,9	66,3	66,3	66,3	66,3
2,0	69,0	68,9	68,9	68,9
2,1	71,7	71,5	71,5	71,5
2,2	74,5	74,0	74,0	74,0
2,3	77,4	76,6	76,6	76,6
2,4	80,6	79,2	79,2	79,2
2,5	83,9	81,8	81,7	81,7
2,6	87,4	84,4	84,3	84,3
2,7	90,7	87,1	86,9	86,9
2,8	94,0	89,8	89,6	89,5
2,9	97,0	92,6	92,2	92,1
3,0	99,9	95,5	94,9	94,7
3,1	103	98,4	97,6	97,3
3,2	106	101	100	99,9
3,3	108	104	103	103

Продолжение табл. 16.15

T, 10^3 К	Давление, 10^5 Па			
	0,001	1	10	100
3,4	111	108	106	105
3,5	114	111	109	108
3,6	116	114	112	111
3,7	119	117	115	113
3,8	122	120	118	116
3,9	124	123	121	119
4,0	127	126	124	122
4,1	130	129	127	124
4,2	132	132	130	127
4,3	135	134	133	130
4,4	138	137	136	133
4,5	140	140	138	136
4,6	143	142	141	139
4,7	145	145	144	142
4,8	147	147	147	144
4,9	149	150	149	147
5,0	151	152	152	150
5,1	153	155	154	153
5,2	155	158	157	155
5,3	156	160	160	158
5,4	158	162	162	161
5,5	160	165	165	163
5,6	161	167	167	166
5,7	163	170	170	168
5,8	165	172	172	171
5,9	167	175	174	173
6,0	169	177	177	176

16.3. ВЯЗКОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

Основным источником информации о вязкости жидкостей служит эксперимент. При этом в силу чувствительности измерений к качеству обработки поверхности камеры, в которой проводится экспериментальное исследование вязкости, погрешность при измерении вязкости в жидкости несколько превышает погрешность измерения вязкости газов. В табл. 16.16—16.21 представлены значения вязкости сжиженных газов и некоторых жидкостей, жидких органических соединений, жидких металлов, сплавов, расплавов солей и оснований при различной температуре.

Таблица 16.16. **Вязкость сжиженных газов и некоторых жидкостей, 10^{-3} Па·с, при различной температуре, К (давление соответствует условиям насыщения) [1, 2, 3]**

T, К	η	T, К	η	T, К	η	T, К	η
He		31	0,0058	115	0,12	82,8	0,16
		32	0,0048	120	0,11	90,1	0,15
1,28	0,00015	33	0,0038	125	0,10	99,6	0,12
1,30	0,00016			130	0,096	112	0,10
1,34	0,00018	Ne		135	0,088	130	0,066
1,59	0,00023			140	0,078	H_2S	
1,76	0,00036	25	0,15	145	0,066		
1,91	0,00068	26	0,14	154	0,026	191	0,52
2,00	0,00096	27	0,13	NH_3		193	0,51
2,09	0,0012	28	0,12			198	0,49
2,11	0,0013	29	0,10	240	0,28	201	0,47
2,14	0,0016	30	0,098	250	0,25	206	0,45
2,16	0,0018	31	0,091	260	0,22	210	0,44
2,18	0,0023	32	0,084	270	0,19	HCl	
2,32	0,0020	33	0,078	280	0,17		
2,64	0,0024	34	0,072	290	0,15	161	0,57
2,93	0,0024	35	0,067	300	0,14	167	0,55
3,74	0,0028	36	0,062	310	0,12	172	0,51
3,81	0,0029	37	0,056	320	0,11	177	0,49
4,02	0,0030	38	0,052	330	0,10	183	0,47
		39	0,047	340	0,097	188	0,46
Ar		40	0,043	350	0,088	F_2	
		41	0,039	360	0,080		
		42	0,034	370	0,070	69,2	0,41
85	0,28	43	0,031	380	0,061	73,2	0,35
90	0,24	44	0,027	390	0,051	75,3	0,33
95	0,21			400	0,040	78,2	0,30
100	0,18	N_2		405	0,025	80,9	0,28
105	0,16					83,2	0,26
110	0,15			H_2O		CO_2	
115	0,13	60	0,36				
120	0,12	65	0,27	273	1,75	255	0,12
125	0,11	70	0,22	280	1,42	260	0,12
130	0,10	75	0,18	300	0,82	265	0,11
135	0,089	80	0,15	320	0,56	270	0,10
140	0,075	85	0,13	340	0,41	275	0,096
145	0,060	90	0,11	360	0,32	280	0,091
150	0,045	95	0,097	380	0,26	285	0,086
151	0,028	100	0,087	400	0,22	290	0,079
		105	0,078	420	0,18	295	0,070
H_2		110	0,071	440	0,16	300	0,060
		115	0,060	460	0,14	304	0,032
		120	0,048	480	0,13	310	0,022
14	0,026	125	0,032	500	0,12	330	0,020
15	0,022	126	0,019	520	0,11	350	0,020
16	0,020			540	0,10	400	0,021
17	0,018	O_2		560	0,094	500	0,025
18	0,016			580	0,086	600	0,028
19	0,015	55	0,80	600	0,079	HI	
20	0,014	60	0,59	620	0,071		
21	0,013	65	0,46	647	0,042	223	1,42
22	0,012	70	0,37	Воздух		227	1,38
23	0,011	75	0,30			232	1,34
24	0,010	80	0,26	90,1	0,13	236	1,30
25	0,0096	85	0,22	107,2	0,094	HBr	
26	0,0088	90	0,20	111	0,090		
27	0,0082	95	0,17	125,1	0,082	187	0,87
28	0,0076	100	0,16	CO		191	0,85
29	0,0070	105	0,14			194	0,84
30	0,0064	110	0,13	73,2	0,22	199	0,82
				75,2	0,20		
				77,8	0,19		

Таблица 16.17. **Вязкость жидких органических соединений, 10^{-3} Па·с, при различной температуре, К (давление соответствует условиям насыщения [1—3]**

Продолжение табл. 16.17

C_2H_6		C_3H_6		CH_4		κ-$C_{12}H_{26}$		κ-C_7H_{14}		C_6H_7		$C_2H_4O_2$		$изо$-C_8H_{18}	
T,	η	T	η	T	η	T	η	T	η	T	η	T	η	T	η
285	0,74	88,7	1,45	90	0,20	300	1,33	300	0,32	273	10,2	303	0,79	100	0,232
300	0,58	89,8	1,27	100	0,15	310	1,16	305	0,31	283	6,5	313	0,69	110	0,214
320	0,45	90,1	1,24	110	0,12	320	1,01	310	0,29	293	4,4	323	0,62	120	0,198
340	0,36	94,3	0,78	120	0,098	330	0,88	320	0,27	303	3,12	333	0,55	130	0,183
360	0,30	98,0	0,54	130	0,082	340	0,77	330	0,25	313	2,30	353	0,45	140	0,169
380	0,25	103	0,36	140	0,071	350	0,68	340	0,23	323	1,80	373	0,38	150	0,156
400	0,20	107	0,27	150	0,063	360	0,61	350	0,21	333	1,50	393	0,32	160	0,146
420	0,17	111	0,22	160	0,054	370	0,54	360	0,20	343	1,28	403	0,30	170	0,135
440	0,15	119	0,16	170	0,045	380	0,49			353	1,10			180	0,125
460	0,13			180	0,035	390	0,44			363	0,94			190	0,115
480	0,11	C_2H_6		190	0,021	400	0,41	κ-C_6H_{12}		373	0,80	κ-C_5H_{12}		200	0,106
500	0,098					420	0,34			383	0,69			210	0,097
520	0,084	100	0,88	C_3H_8		440	0,29	280	0,28	393	0,59	153	2,31	220	0,089
540	0,069	110	0,64			460	0,25	290	0,26			173	1,25	230	0,080
		120	0,48	80	19,2			300	0,24	$C_6H_5NO_2$		193	0,77	240	0,072
C_4H_{10}		130	0,38	100	3,8	C_8H_{10}		310	0,22			203	0,64	250	0,064
		140	0,31	120	1,5			320	0,21	273	3,1	213	0,55	260	0,054
190	0,75	150	0,26	140	0,82	300	0,68	330	0,19	283	2,5	223	0,47	270	0,037
200	0,61	160	0,23	160	0,54	320	0,55	340	0,18	293	2,0	233	0,42		
210	0,50	170	0,20	180	0,39	340	0,46	350	0,16	303	1,7	243	0,38		
220	0,42	180	0,18	200	0,30	360	0,39	360	0,16	313	1,4	253	0,34	κ-C_8H_{18}	
230	0,36	190	0,16	220	0,24	380	0,33	370	0,15	323	1,2	263	0,31		
240	0,31	200	0,14	240	0,19	400	0,28	375	0,14	333	1,1	273	0,28		
250	0,27	210	0,12	260	0,16	420	0,25			353	0,87	283	0,26	213	2,47
260	0,24	220	0,11	280	0,13	440	0,22	C_7H_{14}		373	0,70	293	0,24	223	1,83
270	0,21	230	0,099	300	0,11	460	0,19					303	0,22	233	1,43
280	0,19	240	0,089	320	0,083	480	0,17	290	0,76	$C_4H_8O_2$				243	1,16
290	0,18	250	0,079	340	0,062	500	0,15	300	0,69					253	0,97
300	0,16	260	0,071	360	0,041	520	0,13	320	0,56	293	0,48	κ-$C_6H_{12}O_2$		263	0,83
320	0,14	270	0,052	369	0,021	540	0,12	340	0,46	313	0,38			273	0,71
340	0,12	280	0,054			560	0,10	360	0,38	333	0,31	290	0,76	283	0,62
360	0,095	290	0,046	$CHClF_2$				380	0,38	353	0,25	300	0,67	293	0,55
380	0,074	300	0,036			C_8H_{16}		400	0,27	373	0,21	310	0,59	303	0,49
400	0,051	305	0,022	250	0,28			420	0,22			320	0,53	313	0,44
408	0,023			260	0,25	290	0,90	440	0,19			330	0,47	323	0,39
		C_2H_4		270	0,23	300	0,82	460	0,16					343	0,32
				280	0,21									363	0,28
κ-C_4H_{10}		100	0,80	290	0,19			$(C_2H_5)_2O$						383	0,23
		110	0,56	300	0,17									403	0,19
180	0,69	120	0,42	310	0,15			153	4,25					423	0,16
200	0,48	130	0,33	320	0,13			163	2,54					443	0,14
220	0,36	140	0,26	330	0,12			173	1,71					463	0,12
240	0,28	150	0,22	340	0,10			183	1,24					483	0,10
260	0,23	160	0,19	350	0,088									503	0,084
280	0,19	170	0,16	360	0,072									523	0,070
300	0,16	180	0,14											543	0,056
320	0,13	190	0,13	C_6H_{12}										563	0,041
340	0,11	200	0,11												
360	0,088	210	0,10	290	1,06										
380	0,069	220	0,097	300	0,90										
400	0,055	230	0,089	310	0,77										
420	0,036	240	0,080												
426	0,024	250	0,071												
		260	0,060												
		270	0,046												
		280	0,030												
		283	0,022												

$н$-C_9H_{20}

T	η
263	1,15
273	0,97
283	0,83
293	0,71
303	0,63
313	0,56
323	0,50
333	0,44
343	0,40
353	0,37
363	0,34
373	0,31
383	0,28
393	0,26
403	0,24
413	0,23
423	0,21

$н$-$C_{10}H_{22}$

T	η
243	2,51
253	1,93
263	1,55
273	1,27
283	1,07
293	0,91

Бензин

T	η
223	1,7
233	1,4
253	0,99
273	0,73
293	0,52
313	0,41
333	0,33
353	0,27
373	0,22
393	0,19
413	0,16
433	0,15
453	0,13
473	0,11
493	0,10
513	0,089
533	0,081
553	0,073
573	0,067

Керосин

T	η
223	11,5
233	7,3
253	3,6
273	2,2
293	1,5
313	1,1
333	0,83
353	0,66
373	0,54
393	0,46
413	0,39
433	0,34
453	0,30
473	0,26
493	0,23
513	0,21
533	0,19
553	0,17
573	0,16

CCl_4

T	η
263	1,7
273	1,4
283	1,1
293	0,97
303	0,84
313	0,74
323	0,65
333	0,59
343	0,52
353	0,47
363	0,43
373	0,39
383	0,35
393	0,32
413	0,28
433	0,23
453	0,20

CH_3OH

T	η
173	16
193	5,7
213	3,0
233	1,8
253	1,2
273	0,82
293	0,58
313	0,45
333	0,35
353	0,27
373	0,21
393	0,17
413	0,14
433	0,11
453	0,088
473	0,072
493	0,058
513	0,046

C_2H_5OH (96%)

T	η
273	1,8
293	1,2
313	0,82
333	0,59
353	0,43
373	0,32
393	0,24
413	0,19
433	0,15
453	0,12
473	0,095
493	0,072
513	0,049

$C_3H_8O_3$

T	η
273	12100
283	3950
293	1480
303	600
313	330
323	180
333	102
343	59
353	35
363	21
373	13
393	5,2
413	1,8
433	1,0
453	0,45
473	0,22

$C_4H_{10}O$

T	η
153	4,25
173	1,71
193	0,97
213	0,65
233	0,47
253	0,36
273	0,30
293	0,24
313	0,20
333	0,17
353	0,14
373	0,12

$н$-C_3H_7OH

T	η
203	54,6
213	31,6
223	20,2
233	13,5
243	9,50
253	6,90
263	5,10
273	3,85
283	2,89
293	2,20
303	1,72
313	1,38
333	0,92
353	0,64
363	0,54
373	0,46
383	0,39
393	0,34
403	0,29
413	0,25
423	0,21
433	0,18
453	0,14
473	0,11

$изо$-C_3H_7OH

T	η
213	66,1
223	37,6
233	23,2
243	14,9
253	10,1
263	6,8
273	4,6
283	3,26
293	2,39
303	1,77
313	1,33
323	1,03
333	0,80
343	0,65
353	0,52

$н$-C_3H_9OH

T	η
223	34,7
233	22,4
243	14,6
253	10,3
263	7,4
273	5,19
283	3,87
293	2,95
303	2,28
313	1,78
323	1,41
333	1,14
343	0,93
353	0,76

Продолжение табл. 16.17

T	η
363	0,63
373	0,54
383	0,46

$н$-$C_{11}H_{24}$

T	η
263	2,16
273	1,74
283	1,42
293	1,18
303	1,01
313	0,87
323	0,76
333	0,67
343	0,60
353	0,54
363	0,48
373	0,44
393	0,36
413	0,31
433	0,27
453	0,23
473	0,20

$н$-$C_{12}H_{26}$

T	η
263	2,90
273	2,26
283	1,83
293	1,49
303	1,25
313	1,06
323	0,92
333	0,80
343	0,71
353	0,63
363	0,57
373	0,51

$н$-$C_{13}H_{28}$

T	η
273	2,96
283	2,34
293	1,88
303	1,56
313	1,31
323	1,11
333	0,97
343	0,85
353	0,75
363	0,67
373	0,60
393	0,49
413	0,41
433	0,35
453	0,30
473	0,26

$н$-$C_{14}H_{30}$

T	η
283	2,96
293	2,32
303	1,89
313	1,56
323	1,32
333	1,14
343	0,99
353	0,87
363	0,77
373	0,68

$н$-$C_{15}H_{32}$

T	η
293	2,84
303	2,29
313	1,87
323	1,57
333	1,34
343	1,16
353	1,01
363	0,89
373	0,79

$н$-$C_{16}H_{34}$

T	η
293	3,45
303	2,75
313	2,32
323	1,85
333	1,56
343	1,34
353	1,16
363	1,01
373	0,89
393	0,72
413	0,58
433	0,49
453	0,41
473	0,35
493	0,30
513	0,26

$н$-$C_{17}H_{36}$

T	η
303	3,29
313	2,65
323	2,17
333	1,83
343	1,56
353	1,34
363	1,16
373	1,01
393	0,79
413	0,66
433	0,55
453	0,46
473	0,39
493	0,34
513	0,30
533	0,26
553	0,23
573	0,20

$н$-$C_{18}H_{38}$

T	η
303	3,81
313	3,06
323	2,49
333	2,06
343	1,75
353	1,48
363	1,30
373	1,13

$C_{20}H_{42}$

T	η
313	4,07
323	3,26
333	2,66
343	2,22
353	1,19
363	1,16
373	1,14
393	1,09
413	0,88
433	0,72
453	0,60
373	0,50
493	0,43

C_5H_{10}

T	η
273	0,56
283	0,49
293	0,44
303	0,39
313	0,35

$н$-$C_5H_{10}O_2$

T	η
290	0,58
300	0,53
320	0,42
340	0,34
360	0,27

C_7H_8

T	η
295	0,61
300	0,57
310	0,51
320	0,45
330	0,40
340	0,37
350	0,34
360	0,31
370	0,29
380	0,27
390	0,25
400	0,23
420	0,20
440	0,18
460	0,15
480	0,13
500	0,12
520	0,10
540	0,089
550	0,083

Таблица 16.18. Вязкость жидких металлов, 10^{-3} Па·с [3]

T, K	Li	Na	K	Rb	Cs	Hg	Bi	Pb	Sn	Zn	Sb
300	—	—	—	—	—	1,6	—	—	—	—	—
400	—	0,61	0,41	0,44	0,42	1,2	—	—	—	—	—
500	0,53	0,42	0,30	0,32	0,32	1,0	—	—	1,9	—	—
600	0,43	0,33	0,24	0,26	0,25	0,91	1,7	2,6	1,6	—	—
700	0,36	0,27	0,20	0,22	0,22	0,84	1,2	1,3	1,3	3,3	—
800	0,31	0,23	0,17	0,19	0,19	0,79	—	1,8	1,2	2,6	—
900	0,28	0,20	0,15	0,17	0,17	0,76	1,0	1,5	1,0	2,1	1,6
1000	0,25	0,18	0,14	0,15	0,15	0,73	—	1,3	0.93	1,8	1,2
1100	0,22	0,16	0,12	0,14	0,14	0,71	—	1,2	—	—	1,1
1200	0,21	0,15	0,11	0,13	0,13	—	—	—	—	—	—
1300	0,19	0,14	0,10	0,12	0,12	—	—	—	—	—	—
1400	0,18	0,13	0,098	0,11	0,12	—	—	—	—	—	—
1500	0,17	0,12	0,093	0,11	—	—	—	—	—	—	—
1600	0,16	0,12	0,088	—	—	—	—	—	—	—	—
1700	0,15	0,11	0,083	—	—	—	—	—	—	—	—
1800	0,14	0,11	0,079	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 16.19. Вязкость расплавов некоторых солей и оснований, 10^{-3} Па·с [5]

T, K	η	T, K	η	T, K	η	T, K	η
AgBr		$HgBr_2$		KNO_3		$LiNO_3$	
882	1,86	520	3,0	620	2,73	530	6,48
922	1,66	530	2,0	630	2,58	560	5,48
961	1,49	KBr		650	2,31	580	4,70
1043	1,22	1020	1,5	670	2,09	600	4,32
1076	1,19	1050	1,3	690	1,90	630	3,63
AgCl		1080	1,2	710	1,74	660	2,49
876	1,61	KCl		730	1,60	700	2,05
905	1,47	1060	1,4	750	1,48	$MgCl_2$	
942	1,37	1110	1,2	770	1,38	1080	4,12
1007	1,19	1200	1,0	790	1,30	N_2H_4	
AgI		1310	0,71	810	1,24	278	1,21
878	3,03	$K_2Cr_2O_7$		820	1,21	283	1,12
900	2,75	670	13,2	KOH		288	1,04
970	2,38	690	11,7	670	2,3	293	0,97
1000	2,12	710	10,4	720	1,7	298	0,91
1100	1,56	730	9,2	770	1,3		
$CaCl_2$		750	8,1	820	1,0		
1070	4,94	770	7,0	870	0,8		

Продолжение табл. 16.19

T, K	η	T, K	η	T, K	η	T, K	η
N_2O_4		1120	1,28	1020	440	850	3,28
274	0,52	1150	1,14	1070	300	870	3,06
278	0,49	1170	1,02	1120	210	880	2,95
282	0,47	1200	0,91				
288	0.44	1220	0,82	$PbBr_2$		$SnCl_4$	
Na_3AlF_6		1250	0,75	650	10,2	303	0,81
1270	2,8	1270	0,70	670	8,06	313	0,72
NaBr		$NaNO_3$		690	7,0	323	0,67
1035	1,42	710	1,62	710	6,1		
1053	1,28	730	1,52	730	5,4		
NaCl		NaOH		750	4,7		
590	2,83	620	4,0	770	4,1		
610	2,53	670	2,8	$PbCl_2$			
630	2,28	720	2,8	770	5,53		
650	2,08	770	1,8	790	4,66		
670	1,90	820	1,5	810	4,02		
690	1,74	$NaPO_3$		830	3,59		
1100	1,43	920	1250				
		970	700				

Таблица 16.20. **Вязкость жидкого сплава свинец — олово при различных значениях температуры и молярной доли свинца, 10^{-3} [1]**

T, K	Молярная доля Pb				
	0,000	0,025	0,300	0,382	1,000
460	—	—	—	4,2	—
470	—	—	5,0	—	—
475	—	—	—	2,6	—
480	—	—	3,0	2,1	—
500	—	—	2,5	2,1	—
505	2,6	—	—	—	—
510	2,0	4,2	—	—	—
520	—	1,9	—	—	—
525	—	—	2,2	2,0	—
540	1,8	1,8	—	—	—
550	—	—	2,2	2,2	—
560	1,7	1,6	—	—	—
575	—	—	2,1	2,3	—

Продолжение табл. 16.20

T, K	Молярная доля Pb				
	0,000	0,025	0,300	0,382	1,000
580	1,6	1,6	—	—	—
600	1,6	1,5	2,0	2,3	3,0
612,5	—	—	—	—	2,8
620	1,5	1,5	—	—	—
625	—	—	2,0	2,3	2,6
637,5	—	—	—	—	2,5
640	1,5	1,5	—	—	—
650	—	—	2,0	2,3	2,4
660	1,5	1,4	—	—	—
675	—	—	1,9	2,2	2,2
700	—	—	1,8	2,2	2,2
725	—	—	1,8	—	2,0
750	—	—	—	—	1,9
775	—	—	—	—	1,9

Таблица 16.21. **Вязкость жидкого сплава железо—углерод при различных значениях температуры и молярной доли железа, 10^{-3} Па·с [1]**

T, K	Молярная доля железа								
	0,9514	0,9580	0,9715	0,9790	0,9870	0,9936	0,9960	0,9975	0,9992
1550	—	8,5	—	—	—	—	—	—	—
1575	—	8,0	—	—	—	—	—	—	—
1600	—	7,5	—	—	—	—	—	—	—
1625	—	7,0	9,2	—	—	—	—	—	—
1650	3,8	6,6	8,5	—	—	—	—	—	—
1675	3,3	6,1	7,9	—	—	—	—	—	—
1700	2,9	5,7	7,2	7,2	—	—	—	—	—
1725	2,5	5,2	6,6	6,8	7,7	—	—	—	—
1750	2,2	4,7	6,0	6,4	7,0	—	—	—	—
1775	—	—	5,5	6,0	6,4	—	—	—	—
1800	—	3,9	5,1	5,6	5,8	—	5,7	4,9	7,6
1825	—	3,5	4,7	5,2	5,2	—	4,9	4,4	6,4
1850	—	3,2	4,4	4,9	4,8	4,7	4,3	4,1	5,7
1875	—	—	4,1	4,6	4,4	4,2	3,9	3,9	5,2
1900	—	—	3,9	—	4,1	3,9	3,6	3,8	4,9
1925	—	—	—	—	3,9	3,7	3,4	3,6	4,6
1950	—	—	—	—	3,7	3,6	3,3	3,4	—
1975	—	—	—	—	3,5	3,4	—	—	—
2000	—	—	—	—	—	3,3	—	—	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Touloukian Y. S. e. a.** Viscosity. N. Y.: NBS Edition, 1974.
2. **Stephan K., Lucas K.** Viscosity of dense fluids. N. Y., Lond.: Academ. Press. 1979.
3. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1972.
4. **Голубев И. Ф., Гнездилов Н. Е.** Вязкость газовых смесей. М.: Изд-во стандартов, 1971.
5. **Справочник** химика. М.—Л.: Химия, 1966.

ГЛАВА 17
ДИФФУЗИЯ

А. В. Елецкий

17.1. ВВЕДЕНИЕ

Диффузия — процесс выравнивания концентрации частиц (атомов, молекул, ионов, электронов) в среде. При наличии градиента концентрации ∇N частиц в веществе возникает поток этих частиц $\mathbf{j}$, выравнивающий их концентрации. Связь между потоком и коэффициентом диффузии D выражается законом Фика

$$\mathbf{j} = -D\nabla N. \qquad (17.1)$$

Это соотношение справедливо, когда размер системы в направлении градиента много больше длины свободного пробега частиц в среде, а изменение концентрации на расстоянии длины свободного пробега много меньше характерного значения концентрации частиц N. Кроме того, предполагается отсутствие внешних полей, градиентов температуры и давления.

17.2. ДИФФУЗИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ В ГАЗАХ

В идеальных газах, где плотность нейтральных частиц (атомов, молекул) N удовлетворяет условию

$$N \ll 1/a_0^3 \qquad (17.2)$$

($a_0 \approx 10^{-8} \div 10^{-7}$ см — характерный радиус действия межмолекулярных сил), диффузия определяется парными соударениями пробной частицы с атомами или молекулами. Поэтому вплоть до очень высоких давлений * коэффициент диффузии обратно пропорционален плотности частиц газа и выражается через характеристику парного соударения пробной частицы и частицы газа — диффузионное сечение рассеяния σ^*.

Согласно элементарной кинетической теории газов выражение для коэффициента диффузии малой примеси в газе, состоящем из одного сорта частиц, а также для коэффициента самодиффузии имеет вид

$$D = \langle v \rangle \lambda / 3, \qquad (17.3)$$

где $v = \sqrt{2kT/\mu}$ — средняя относительная скорость соударения частиц примеси и частиц газа; μ — приведенная масса сталкивающихся частиц; T — температура газа; $\lambda = 1/N\sigma^*$ — длина пробега пробных частиц в газе; N — плотность частиц газа. Соотношение (17.3) является точным, если σ^* не зависит от энергии сталкивающихся частиц. В противном случае понятие длины пробега теряет определенность и указанное соотношение справедливо для эффективных величин. Принято приводить значения коэффициента диффузии не при постоянной плотности газа, а при постоянном давлении. В этом случае с учетом уравнения газового состояния $p = NkT$ получаем зависимость

$$D = D_0 (T/273)^{1,5},$$

где D_0 — коэффициент диффузии в нормальных условиях. Это соотношение справедливо при тех же условиях, что и соотношение (17.3).

Таблица 17.1. **Параметры зависимости (17.4) [1]**

Газ	D_0, см²/с	α	Температурный интервал, К	Газ	D_0, см²/с
He	1,62	1,71	14—296	H_2	1,28
Ne	0,452	—	—	CO	0,175
Ar	0,156	1,92	77—353	HCl	0,125
Kr	0,08	—	—	HBr	0,079
Xe	0,048	—	—	CO_2	0,097
N_2	0,17	1,9	77—353	CH_4	0,206
O_2	0,18	1,92	77—353	H_2O (пар)	0,277
UF_6	0,0165	1,6	144—296		

Коэффициент самодиффузии газов. В табл. 17.1 представлены значения коэффициентов самодиффузии D_0 при нормальных условиях ($T = 273$ К, $p = 0{,}1$ МПа). Дан интервал температур, внутри которого коэффициент диффузии можно аппроксимировать степенной функцией

$$D(T) = D_0 (T/273)^{\alpha}; \qquad (17.4)$$

приведены значения параметра α.

* Область давлений, где указанная зависимость выполняется с достаточно высокой точностью (погрешность 2—5%), зависит от температуры. Вблизи критической точки эта зависимость может существенно нарушаться.

Таблица 17.2. **Коэффициент самодиффузии газов при высоких температурах, см²/с (давление атмосферное; теоретические данные получены с использованием потенциала межатомного взаимодействия, восстановленного из экспериментов по рассеянию атомных пучков) [1]**

Газ	Температура, 10^3 К																					
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,7	7	8	9	10	11	12	13	14	15
He	13,3	26,9	46,7	70,3	98,6	130	167	207	250	299	350	407	467	595	738	898	1070	1260	1460	1670	1840
Ne	3,9	7,76	12,7	18,5	25,2	32,6	41,1	50,4	60,7	72,0	83,8	96,5	110	139	172	207	244	284	325	318	414
Ar	1,51	3,0	5,03	7,50	10,4	13,9	17,8	22,1	26,8	31,9	37,4	43,3	49,5	62,8	77,4	93,2	111	129	148	169	190
Kr	0,85	1,72	2,83	4,14	5,7	7,4	9,3	11,4	13,8	16,4	19,2	22,2	25,5	32,6	40,7	49,6	59,6	70,2	81,5	93,7	107
Xe	0,50	1,01	1,65	2,43	3,32	4,32	5,42	6,6	8,0	9,4	10,9	12,6	14,4	18,2	22,5	27,2	32,4	37,7	43,4	49,4	55,7
N_2	1,56	3,08	5,05	7,5	10,4	13,8	17,6	21,9	26,6	31,8	37,3	43,2	49,6	62	79	96	113	133	153	174	197

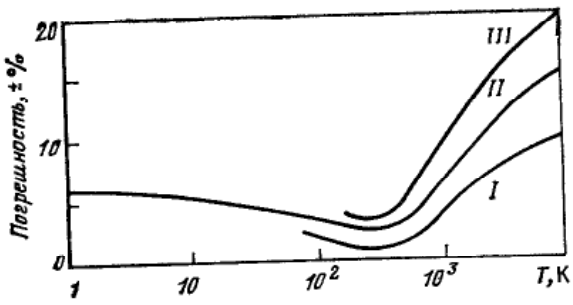


Рис. 17.1. Погрешность данных, представленных в табл. 17.3, в зависимости от температуры

В табл. 17.2 приведены значения коэффициента самодиффузии газов при высоких температурах.

Коэффициент взаимной диффузии в газах. В двухкомпонентной смеси газов при отсутствии внешних полей, химических реакций, а также градиентов температуры и давления потоки $\mathbf{j}_1$ и $\mathbf{j}_2$ частиц первого и второго сортов выражаются соотношениями

$$\mathbf{j}_1 = nD_{12}\,\mathbf{grad}\,x_1; \qquad \mathbf{j}_2 = -nD_{21}\,\mathbf{grad}\,x_2, \tag{17.5}$$

где n — полная плотность частиц; x_1 и x_2 — относительная концентрация частиц первого и второго сорта. Эти соотношения справедливы в системе отсчета, в которой отсутствует результирующий поток частиц ($\mathbf{j}_1+\mathbf{j}_2=0$), поскольку, кроме того, $x_1+x_2=1$, $D_{12}=D_{21}$.

Коэффициент диффузии D_{AB} частиц произвольного сорта в смеси двух газов A и B определяется соотношением (закон Бланка), справедливым с погрешностью до нескольких процентов:

$$D_{AB}^{-1} = x_A/D_{1A} + x_B/D_{1B}, \tag{17.6}$$

где D_{1A} и D_{1B} — коэффициент взаимной диффузии пробной частицы в газах A и B при давлении, равном суммарному давлению в рассматриваемой смеси.

Основным источником информации о коэффициенте взаимной диффузии в газах является эксперимент. Точность, с которой известны значения этого коэффициента, существенно зависит от интервала температур, а также от сорта исследуемых газов. Представленные ниже результаты измерений коэффициентов взаимной диффузии различных пар газов разделены на четыре группы в зависимости от класса точности (табл. 17.3, 17.4). Погрешность, характеризующая значения коэффициентов взаимной диффузии первых трех групп (I, II, III), видна из рис. 17.1, а для четвертой группы соответствующие сведения представлены в табл. 17.4.

В табл. 17.5 и 17.6 приводятся параметры, входящие в эмпирические зависимости коэффициентов взаимной диффузии при атмосферном давлении. Для систем, представленных в табл. 17.5, эта зависимость имеет вид

$$D = D_0 (T/273)^a \exp(-S/T - S'/T^2), \tag{17.7}$$

где S, S' — эмпирические параметры, а экспоненциальный множитель без потери точности может быть опущен для температур свыше 200 К.

Для систем, представленных в табл. 17.6, эмпирическая зависимость имеет вид

$$D = D_0 (T/273)^a \exp(-S/T), \tag{17.8}$$

причем экспоненциальный множитель можно заменить единицей при $T>20$ S.

В табл. 17.7, 17.8 приведены значения коэффициента диффузии метастабильных атомов в инертных газах.

17.3. ДИФФУЗИЯ В ЖИДКОСТЯХ

Диффузия больших молекул в растворителе. Диффузия в жидкостях обусловлена процессами многочастичного взаимодействия пробной частицы с частицами жидкости. Поэтому теоретическое определение коэффициентов диффузии в жидкостях весьма затруднено и практически единственным источником надежной информации является эксперимент. Исключение составляет случай диффузии больших молекул в растворителе с низкой молекулярной массой, для описания которого применима формула Эйнштейна—Стокса

$$D_{12} = kT/6\pi r\eta, \tag{17.9}$$

где r — радиус большой молекулы, форма которой аппроксимируется сферой; η — динамическая вязкость жидкости. В соотношении (17.9), которое справедливо для многих систем, величина r остается неопределенным параметром, который обычно известен с точностью до множителя 2.

Диффузия в растворах. Коэффициенты диффузии для многих слабых растворов хорошо аппроксимируются следующим эмпирическим выражением [5]:

$$D_{12} = K_1 K_2, \tag{17.10}$$

где K_1 — коэффициент, не зависящий от свойств растворителя, а K_2 — коэффициент, не зависящий от свойств растворенного вещества. Коэффициенты K_1 и K_2 зависят от температуры, однако если известно значение D_{12} при температуре T_1, то величина $D_{12}(T_2)$ может быть определена на основании следующего соотношения:

$$D_{12}(T_2) = D_{12}(T_1)\,\frac{T_2}{T_1}\,\frac{\eta_2(T_1)}{\eta_2(T_2)}, \tag{17.11}$$

где $\eta_2(T_2)$, $\eta_2(T_1)$ — динамическая вязкость растворителя при температурах T_2 и T_1 соответственно. Погрешность, характеризующая соотношения (17.10) и (17.11), составляет десятки процентов. Подобная погрешность вообще характеризует имеющуюся информацию о коэффициентах диффузии в жидкостях. Значения K_1 и K_2 представлены в табл. 17.9 и 17.10.

Коэффициент диффузии в сильноразбавленном растворе электролита выражается соотношением

$$D_{12} = \frac{RT\,[1/n^+ + 1/n^-]}{\left[1/\lambda_0^+ + 1/\lambda_0^-\right] F}, \tag{17.12}$$

где R=8,314 Дж/(К·моль) — газовая постоянная; T — температура; λ_0^+, λ_0^- — проводимость раствора по положительным и отрицательным ионам в пределе нулевых концентраций, А·г=экв/(см^4·В); n^+, n^- — валентности катиона и аниона соответственно; F=96 485 Кл/моль — число Фарадея. Значения ионной проводимости $\lambda_0^{\pm}$ некоторых водных растворов приведены в табл. 17.11. Значения коэффициента диффузии некоторых веществ, растворенных в воде, приведены в табл. 17.12 и 17.13. Следует отметить, что в жидкостях, где существенную роль в процессе диффузии играет многочастичное взаимодействие, неприменимы соотношения взаимности, т. е. $D_{12}\neq D_{21}$.

В табл. 17.14—17.20 приведены значения коэффициента диффузии в различных жидкостях и расплавах.

Таблица 17.3. **Погрешность значения коэффициента диффузии для систем трех групп, %**

Группа точности	Система	Температура, К					
		1,75	65	300	500	10^3	10^4
I	He — Ne, He — Ar, He — Kr, He — Xe; Ne — Ar, Ne — Kr, Ne — Xe, Ar — Kr, Ar — Xe, Kr — Xe, H_2 — N_2	—	2	1	2	5	10
II	^{3}He — ^{4}He, He — H_2, He — N_2, He — CO, He — O_2, He — воздух, He — CO_2, H_2 — Ne, H_2 — Ar, H_2 — Kr, H_2 — D_2, CO — воздух, CO — CO_2, N_2 — Ar, N_2 — CO, N_2 — CO_2	6	4	2	3	7	15
III	Ar — CH_4, Ar — CO, Ar — CO_2, Ar — воздух, Ar — SF_6, H_2 — Xe, H_2 — CH_4, H_2 — O_2, H_2 — SF_6, CH_4 — He, CH_4 — N_2, CH_4 — O_2, CH_4 — воздух, CH_4 — SF_6, N_2 — Ne, N_2 — Kr, N_2 — Xe, N_2 — CH_4, N_2 — O_2, N_2 — SF_6, O_2 — Ar, O_2 — CO_2, O_2 — SF_6, CO_2 — воздух, CO_2 — N_2O, CO_2 — SF_6, SF_6 — He, SF_6 — воздух, CO — Kr, CO — O_2, CO — воздух, CO — CO_2, CO — SF_6	—	—	3	4	10	20

Таблица 17.4. **Погрешность значений коэффициентов взаимной диффузии для систем IV группы**

Система	Интервал температур, К	Погрешность, %
H_2O — N_2	282—373	4
H_2O — O_2	282—1070	7
H_2O — воздух	282—1070	5—10
H_2O — CO_2	296—1640	7—10
CO_2 — Ne	195—625	3—5
CO_2 — C_3H_8	298—550	3—5
H — H_2	300	5
	1000	30
H — N_2; O — N_2;	300	10
O — O_2	1000	25
H — He; H — Ar;	300	15
O — He; O — Ar	1000	30

Таблица 17.5 **Параметры выражения (17.7), действительные в температурном интервале T_1—10^4 К [2]**

Система	D_0, см²/с	a	S, К	S', К²	T_1, К	Группа точности
^{3}He — ^{4}He	1,55	1,501	—0,963	1,894	1,74	II
Ne — Ne	0,235	1,509	1,87	—	65	I
He — Ar	0,635	1,552	1,71	—	77	I
He — Kr	0,503	1,609	—32,65	2036	77	I
He — Xe	0,391	1,644	—68,87	5416	169	I
He — H_2	1,32	1,510	—	—	90	II
He — N_2	0,613	1,524	—	—	77	II
He — CO	0,613	1,524	—	—	77	II
Ne — Ar	0,278	1,546	1,82	1170	90	I
Ne — Kr	0,242	1,555	20,4	—	112	I
Ne — Xe	0,197	1,584	10,1	—	169	I
Ar — Kr	0,14	1,556	47,3	—	169	I
Ar — Xe	0,122	1,563	59,9	—	169	I
Ar — N_2	0,79	1,519	39,8	—	242	II
Kr — Xe	0,0812	1,608	52,7	—	169	I
Kr — H_2	0,664	1,564	26,4	—	77	II
H_2 — D_2	0,99	1,500	6,072	38,10	14	II
H_2 — N_2	0,66	1,548	—280	1067	65	I
H_2 — CO	0,66	1,548	—2,80	1077	65	II
N_2 — CO	0,175	1,576	36,2	3825	78	II

Таблица 17.6. **Параметры эмпирической зависимости (17.8) [2]**

Система	D_0, см²/с	a	S, К	Температурный интервал, К	Группа точности
He — CH_4	0,57	1,750	—	298—10^4	III
He — O_2	0,45	1,710	—	244—10^4	II
He — воздух	0,62	1,729	—	244—10^4	II
He — CO_2	0,52	1,720	—	200—530	II
He — SF_6	0,35	1,627	—	290—10^4	III
Ne — H_2	0,99	1,731	—	90—10^4	II
Ne — N_2	0,28	1,743	—	293—10^4	III
Ne — CO	0,22	1,776	—	195—625	III
Ar — CH_4	0,172	1,785	—	307—10^4	III
Ar — N_2	0,17	1,752	—	244—10^4	II
Ar — CO	0,17	1,752	—	244—10^4	III
Ar — O_2	0,167	1,736	—	243—10^4	III
Ar — воздух	0,165	1,749	—	244—10^4	III
Ar — CO_2	0,177	1,646	89,1	276—1800	III
Ar — SF_6	0,114	1,596	145,4	328—10^4	III
Kr — N_2	0,13	1,766	—	248—10^4	III
Kr — CO	0,13	1,766	2	248—10^4	III
Xe — H_2	0,54	1,712	16,9	242—10^4	III
Xe — N_2	0,106	1,789	—	242—10^4	III
H_2 — CH_4	0,62	1,765	—	293—10^4	III
H_2 — O_2	0,69	1,732	—	252—10^4	III
H_2 — воздух	0,66	1,750	—	252—10^4	II
H_2 — CO_2	0,56	1,750	11,7	200—550	II
H_2 — SF_6	0,52	1,570	102,5	298—10^4	III
CH_4 — N_2	0,2	1,750	—	298—10^4	III
CH_4 — O_2	0,22	1,695	44,2	294—10^4	III
CH_4 — воздух	0,186	1,747	—	298—10^4	III
CH_4 — SF_6	0,119	1,657	69,2	298—10^4	III
N_2 — O_2	0,182	1,724	—	285—10^4	III
N_2 — H_2O	0,204	2,072	—	282—373	IV
N_2 — CO_2	0,208	1,570	113,6	288—1800	II
N_2 — SF_6	0,122	1,590	119,4	328—10^4	III
CO — O_2	0,175	1,724	—	285—10^4	III
CO — воздух	0,182	1,730	—	285—10^4	III
CO — CO_2	0,142	1,803	—	282—473	III
CO — SF_6	0,129	1,584	139,4	297—10^4	III
O_2 — H_2O	0,207	2,072	—	282—450	IV
O_2 — H_2O	0,264	1,632	—	450—1070	IV
O_2 — CO_2	0,174	1,661	61,3	287—1083	III
O_2 — SF_6	0,138	1,522	129,0	297—10^4	III

Продолжение табл. 17.6

Система	D_0, см²/с	a	S, К	Температурный интервал, К	Группа точности
H_2O — воздух	0,205	2,072	—	282—450	IV
H_2O — воздух	0,26	1,632	—	450—1070	IV
CO_2 — воздух	0,207	1,590	102,1	280—1800	IV
SF_6 — воздух	0,126	1,576	121,1	328—10^4	IV
H_2O — CO_2	0,41	1,500	307,9	296—1640	IV
CO_2 — N_2O	0,095	1,866	—	195—550	III
CO_2 — SF_6	0,069	1,886	—	328—472	III
H — He	2,35	1,732	—	275—10^4	IV
H — Ar	0,112	1,597	—	275—10^4	IV
H — H_2	0,184	1,728	—	190—10^4	IV
N — N_2	0,29	1,774	—	280—10^4	IV
O — He	0,84	1,749	—	280—10^4	IV
O — Ar	0,23	1,841	—	280—10^4	IV
O — N_2	0,28	1,774	—	280—10^4	IV
O — O_2	0,28	1,774	—	280—10^4	IV

Таблица 17.7. **Коэффициент диффузии метастабильных атомов инертных газов в собственном газе при давлении 133 Па (1 мм рт. ст.), см²/с (погрешность данных не превышает 10 %)** [3]

Атом	Температура, К					
	20	40	77	150	300	500
He (2^3S)	60	100	160	260	460	710
He (2^1S)	45	75	120	210	370	570
Ne ($^3P_2$)	19	33	56	—	—	—
Ar ($^3P_2$)	8	13	20	34	64	—
Kr ($^3P_2$)	—	12	12	20	38	51
Xe ($^3P_2$)	—	—	8	13	22	33

Таблица 17.8. **Коэффициент диффузии метастабильных атомов ртути в инертных газах при различной температуре и атмосферном давлении D, см²/с** [4]

Атом инертного газа	Состояние атома ртути	Температура, К							
		296	380	475	515	580	680	780	890
He	$6\,^3P_0$	0,59	1,1	—	2,1	—	—	—	5,8
	$6\,^3P_0$	0,51	1,0	—	1,9	—	—	—	5,3
He	$6\,^3P_0$	0,31	0,57	0,93	—	1,4	1,9	2,4	2,9
	$6\,^3P_0$	0,27	0,48	0,86	—	1,3	1,8	2,3	2,9
Ar	$6\,^3P_0$	0,16	0,28	0,46	—	0,74	0,97	1,2	1,6
	$6\,^3P_0$	0,12	0,21	0,39	—	0,56	0,80	1,0	1,4
Kr	$6\,^3P_0$	0,1	0,19	0,32	—	0,50	0,65	—	1,1
	$6\,^3P_0$	0,07	0,13	0,23	—	0,35	0,49	—	—
Xe	$6\,^3P_0$	0,06	0,13	0,23	—	0,33	0,45	0,58	0,7
	$6\,^3P_0$	0,048	0.10	0,18	—	0,27	0,37	0,47	—

17.4. ДИФФУЗИЯ В ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВАХ

Основным источником информации о коэффициентах диффузии в твердом теле, как и в жидкости, является эксперимент. При этом вследствие крайней чувствительности результатов измерений к степени чистоты исследуемого образца, способу его приготовления и к колебаниям температуры результаты различных измерений обычно характеризуются разбросом в пределах порядка величины. В связи с этим данные, представленные в таблицах, являются результатом усреднения по большому числу экспериментальных данных и в силу произвольного характера усреднения справедливы в лучшем случае по порядку величины.

Температурная зависимость коэффициента диффузии в твердом теле хорошо описывается полуэмпирической формулой

$$D = D_0 \exp(-Q/RT), \qquad (17.13)$$

где D_0 — фактор диффузии; Q — энергия активации. Соотношение (17.13) выполняется в широком диапазоне температур в пределах точности измерений коэффициента диффузии. Для веществ, имеющих кристаллическую структуру, коэффициент диффузии является тензором. Приведенные ниже данные являются в основном результатом усреднения этого тензора по направлениям. В отдельных случаях приведены значения коэффициента диффузии в направлениях, параллельном ($D_\parallel$) и перпендикулярном ($D_\perp$) главной оси кристалла. В табл. 17.21—17.40 представлены значения параметров, входящих в (17.13), а также интервал температур, где производились измерения.

Таблица 17.9. **Значения K_1 для некоторых растворенных веществ в разбавленном растворе [4]**

Растворенное вещество	T, К	K_1, 10^{-3} см·с$^{-1/2}$	Растворенное вещество	T, К	K_1, 10^{-3} см·с$^{-1/2}$
Аллиловый спирт	288	2,3	Пиридин	293	2,7
Анилин	288	2,2	Пропиловый спирт	288	2,2
Ацетон	288	3,5	Пропионовая кислота	288	3,0
Бензальдегид	288	2,4	Тетрахлорметан	298	3,6
Бензол	298	3,5	Трихлорметан	288	3,3
Бромбензол	288	2,4	Толуол	298	3,0
Бромэтан	288	4,0	Уксусная кислота	298	2,3
Бутиловый спирт	288	2,0	Фенол	278	1,9
Вода	298	2,6	Фурфурол	288	2,2
1, 2-Дибромэтан	288	2,9	Хлоральгидрат	288	2,0
Диэтиловый эфир	288	3,8	Хлорбензол	288	2,6
Изоаллиловый спирт	288	2,3	Этиловый спирт	288	2,5
Иодметан	280	3,9			
Метиловый спирт	288	2,9			
Муравьиная кислота	279	4,2			
Нитробензол	288	2,3			

Таблица 17.10. **Значения K_2 для различных растворителей [5]**

Растворитель	T, К	K_2, 10^{-3} см·с$^{-1/2}$
Бензол	288	5,9
Бромбензол	298	5,1
Вода	298	4,1
Метиловый спирт	288	6,7
Тетрахлорметан	298	4,2
Толуол	298	6,1
Хлорбензол	298	5,7
Этиловый спирт	298	3,8

Таблица 17.11. **Предельные (при нулевой концентрации) значения ионной проводимости в воде при T = 300 К, А·г-экв/(см^4·В). Данные приведены к концентрации 1 г-экв/см^3 [6]**

Катион	λ_0^+	Анион	λ_0^-
H^+	350	OH^-	198
Li^+	38,7	Cl^-	76,3
Na^+	50,1	Br^-	78,3
K^+	73,5	I^-	76,8
NH_4^+	73,4	NO_3^-	71,4
Ag^+	61,9	ClO_4^-	68,0

Продолжение табл. 17.11

Катион	λ_0^+	Анион	λ_0^-
Tl^+	74,7	HCO_3^-	44,5
$1/2\ Mg^{2+}$	53,1	HCO_2^-	54,6
$1/2\ Ca^{2+}$	59,5	$CH_3CO_2^-$	40.9
$1/2\ Sr^{2+}$	50,5	$ClCH_2CO_2^-$	39,8
$1/2\ Ba^{2+}$	63,6	$CNCH_2CO_2^-$	41,8
$1/2\ Cu^{2+}$	54	$CH_3CH_2CO_2^-$	35,8
$1/2\ Zn^{2+}$	53	$CH_3(CH_2)_2CO_2^-$	32,6
$1/3\ La^{3+}$	69,5	$C_6H_5CO_2^-$	32,3
$1/3\ CO(NH_3)_6^{3+}$	102	$HC_2O_4^-$	40,2
		$1/2\ C_2O_4^{2-}$	74,2
		$1/2\ SO_4^{2-}$	80
		$1/3\ Fe(CN)_6^{3-}$	101
		$1/4\ Fe(CN)_6^{4-}$	111

Таблица 17.12. **Коэффициент диффузии неорганических веществ, растворенных в воде [1]**

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	T, К	D, 10^{-5} см^2/с	Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	T, К	D, 10^{-5} см^2/с
Br_2	0,00105	300	1,25	$CoCl_2$	0,0062	291	0,7
	0,00173	300	1,24		0,0127	284	0,73
	0,00183	300	1,24	$CuCl_2$	1,5	283	0,5
	0,00193	300	1,23	$CuSO_4$	0,1	290	0,45
	0,00230	300	1,22		0,5	290	0,34
	0,00309	300	1,20		0,95	290	0,27
	0,00429	300	1,19				
	0,00501	300	1,18	D_2O	0	300	2,5
CO_2	0	291	1,46				
CO	0	300	2,67	H_2	0	291	3,6
$CaCl_2$	0,29	282	0,79	HCl	0	283	2,2
	0,37	282	1,09		0	298	3,1
	1,5	282	0,84		0,02	283	2,1
$CdSO_4$	0	290	0,35		0,02	298	3,0
	0,5	290	0,34		0,05	283	2,0
	1,0	290	0,33		0,05	298	2,9
	1,5	290	0,44		0,2	283	2,1
	2,0	290	0,43		0,2	298	3,0
	3,0	290	0,44		0,35	283	2,1
	3,5	290	0,34		0,35	298	3,1
	4,5	290	0,36		0,43	273	1,6
	5,5	290	0,4		1,0	298	3,6
	6,5	290	0,45		2,0	273	1,8
	7,0	290	0,48		2,0	284	2,5
Cl_2	0,1	285	1,4		5,0	273	2,2
	0,1	290	1,3		6,0	284	3,1
					8,0	273	2,7
					9,0	285	3,4

Продолжение табл. 17.12

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	T, К	D, 10^{-5} см²/с
HNO_3	0,84	278	1,7
	3,0	279	1,8
	3,0	280	2,4
	20	282	2,3
H_2O	0	293	0,9
KBr	1,0	283	1,2
K_2CO_3	3,0	283	0,7
KCl	0,00125	298	1,96
	0,00194	298	1,95
	0,00325	298	1,95
	0,00585	298	1,94
	0,00704	298	1,93
	0,00980	298	1,92
	0,02	298	1,91
	0,1	298	1,89
	0,5	298	1,82
	0	282	1,7
	0,05	282	1,56
	0,10	282	1,54
	0,20	282	1,53
	0,50	282	1,55
	1,00	282	1,61
	1,5	282	1,67
	2,00	282	1,73
KI	0,01	273	1,3
	0,01	291	1,7
	0,10	273	1,24
	0,10	291	1,61
	1,0	273	1,21
	1,0	291	1,59
	5,5	273	1,37
	5,5	291	1,8
KNO_3	0,05	291	1,45
	0,20	291	1,39
	0,40	291	1,35
	0,80	192	1,28
	1,0	291	1,24
	2,0	291	1,15
	2,5	291	1,17
KOH	0,1	287	2,0
	0,9	287	2,16
	3,9	287	2,82
K_2SO_4	0,02	293	1,27
	0,05	293	1,12
	0,28	293	1,0
	0,95	293	0,92
LiBr	2,3	283	0,93
	4,4	283	1,04
LiCl	0,01	282	0,88
	0,01	291	1,16
	1,0	282	0,81
	1,0	291	1,06
	4,2	282	0,84
	4.2	291	0,11
LiI	1,3	283	0,93
$MgSO_4$	0,5	288	0,54
	1,0	288	0,53
	3,0	288	0,59
	4,5	288	0,73
N_2	0	291	1,63
NH_3	0,683	277	1,23
	3,55	277	1,23
NaBr	2,9	283	1,0
Na_2CO_3	2,4	283	0,45
NaCl	0,05	291	1,26
	0,40	291	1,2
	1,00	291	1,24
	2,0	291	1,29
	3,0	291	1,36
	4,0	291	1,43
	5,0	291	1,49
NaI	1,0	283	0,93
	2,0	283	1,04
$NaNO_3$	0,6	286	1,04
	3	284	0,88
	5	284	0,96
	6	286	0,90
NO	0	289	1,54
I_2	0,05	298	1,25
O_2	0	298	2,60
NaOH	0,02	285	1,3
	0,1	285	1,29
	0,9	285	1,21
	3,9	285	1,14
Na_2SO_4	1,4	283	0,76
$NaCH_3COO$	0,2	285	0,71
$Ni(NO_3)_2$	0,0088	291	0,667
	0,0226	291	0,822
	0,068	291	0,93
$Pl(NO_3)_2$	0,22	285	0,82
	0,82	285	0,76
$ZnSO_4$	0,025	293	0,58
	0,050	293	0,54
	0,55	293	0,12
	2,95	293	0,38
$Zn(CH_3COO)_2$	2	273	0,139
	2	291	0,243

Таблица 17.13. Коэффициент диффузии органических соединений в водных растворах при нулевой концентрации [7]

Растворенное вещество	T, К	D, 10^{-5} см²/с
Аллаксан	293	0,67
Арабиноза	293	0,70
Ацетамид	293	1,05
Ацетонитрил	288	1,26
Анилин	293	0,92
Бензол	275	0,58
	283	0,75
	293	1,02
	333	2,55
н-Бутан	277	0,50
	293	0,89
	333	2,51
Винилхлорид	298	1,34
	323	2,42
	348	3,67
Гидрохинон	293	0,78
Глицерин	288	0,72
	283	0,63*1
Глюкоза	288	0,52
Диэтиламин	288	0,97
Кислота винная	288	0,61
Кислота уксусная	293	1,19
	286	0,91*2
Кислота бензойная	298	1,21
Кислота щавелевая	293	1,53
Кофеин	283	0,42
Лактоза	283	0,46
Мальтоза	283	0,328
	293	0,426
Маннит	293	0,605
Метан	283	0,328
	293	0,85
	333	3,55
Метилциклопентан	275	0,48
	283	0,59
	293	0,85
	333	1,92
Мочевина	285	0,99
	293	1,20
	298	1,38
Никотин	293	0,53
Пентаэритрит	293	0,69
Пиридин	288	0,58
Пирогаллол	288	0,56
Пропилен	298	1,44
Рафиноза	293	0,36*3
Резорцин	293	0,77
Сахароза	285	0,36
Сероводород	288	1,43
Спирт:		
аллиловый	288	0,90
бензиловый	293	0,82
бутиловый	288	0,77
изоамиловый	288	0,69
метиловый	288	1,28
пропиловый	288	0,87
этиловый	283	0,84
	288	1,00
	298	1,24
Уретан	288	0,87
Фурфурол	293	0,87
Этилацетат	0	1,04
Этиленгликоль	298	1,16
Этилбензол	275	0,58
	283	0,75
	293	1,02
	333	2,55

*1 Концентрация 0,125 моль/л.
*2 Концентрация 0,01 моль/л.
*3 Концентрация 0,05 моль/л.

Таблица 17.14. Коэффициент диффузии воды в органических растворителях, $T = 300$ К, молярное содержание воды <1 %, 10^{-5} см²/с [6]

Растворитель	D	Растворитель	D
Спирт:		Этилацетат	3,20
метиловый	1,75	Анилин	0,70
этиловый	1,24	*н*-Гексадекан	3,76
н-пропиловый	0,61	*н*-Бутилацетат	2,87
изо-пропиловый	0,38	*н*-Масляная кислота	0,79
н-бутиловый	0,56		
изо-бутиловый	0,30	Толуол	6,19
бензиловый	0,37	Дихлорметан	6,53
Этиленгликоль	0,18	1, 1, 1-Трихлорэтан	4,64
Триэтиленгликоль	0,19	Трихлорэтилен	8,82
Глицерин	0,0083	Нитробензол	2,80
Ацетон	4,56	Пиридин	2,73
Фурфурол	0,90		

Таблица 17.15. Коэффициент диффузии различных веществ в метиловом спирте, $T = 288$ К, молярная концентрация раствора 1 %, 10^{-5} см²/с [7]

Растворенное вещество	D	Растворенное вещество	D
Аллиловый спирт	1,80	мета-Нитробензальдегид	1,24
Анилин	1,49	Нитрофенол	1,38
Ацетанилид	1,50	Пиридин	1,58
Ацетилдифениламин	0,98	Салол	1,29
Ацетонитрил	2,64	2, 4, 6-Трибромфенол	1,12
Беизальдегид	1,66	2, 4, 6-Тринитрофенол	1,32
Броманилин	1,41	2, 4,6-Трихлорфенол	1,21
Бромбензол	1,75	Уретан	1,41
Бромнитрофенол	1,43	Фенотол	1,40
3-Бромпропилен	2,22	Фенилацетат	1,62
Бромфенол	1,34	Фенол	1,40
Ванилин	1,00	Фенолфталеин	0,78
Гидрохинон	1,25	Фурфурол	1,70
Дибензиламин	0,86	Хлоралгидрат	1,16
н-Дибромбензол	1,55	Хлоранилин	1,34
Дибромнафталин	1,33	Хлорбромметан	2,50
Динодметан	1,68	1-Хлоргидрин	1,30
Динитробензол	1,56	Хлорнитробензол	1,68
Динитронафталин	1,32	Хлороформ	2,07
2,4-Динитрофенол	1,40	Хлорфенол	1,32
1,1-Динитрогидрид	1,36	Четыреххлористый углерод	1,70
Дихлорнафталин	1,52	Этил:	
Изоамиловый спирт	1,34	бромистый	2,40
Иодбензол	1,65	иодистый	2,16
Иодоформ	1,83	Этилен:	
3-Иодпропилен	1,72	бромистый	1,95
Кислота:		иодистый	1,56
промпропионовая	1,35	Этилнитрат	2,20
дихлоруксусная	1,36		
иодпропионовая	1,36		
молочная	1,36		
пропионовая	1,62		
трибромуксусная	1,23		
трихлоруксусная	1,45		
фталевая	1,30		
хлорбензойная	1,29		
хлоруксусная	1,52		

Таблица 17.16. Коэффициент диффузии в различных жидкостях при бесконечном разбавлении. В случае раствора ненулевой концентрации последняя указана в скобках, моль/л [5, 6]

Растворимое вещество	Растворитель	T, К	D, 10^{-5} см²/с
Ацетон	Хлороформ	298	2,35
		313	2,90
Бензол		288	2,51
		298	2,89
		313	3,55
		328	4,25
н-Бутилацетат		298	1,71
Диэтиловый эфир		288	2,07
		298	2,14
Иод (0,05)		283	1,93
Метилэтилкетон		298	2,13
Фенол		283	1,60
Этилацетат		298	2,02
Этиловый спирт		288	2,20

Продолжение табл. 17.16

Растворимое вещество	Растворитель	T, К	D, 10^{-5} см²/с
Анилин	Бензол	298	1,96
Бензойная кислота		298	1,38
Бромбензол		280	1,45
Винилхлорид		280	1,77
Гептан		298	2,10
		318	2,75
		338	3,65
		353	4,25
Кислород		303	2,89
Метилэтилкетон		303	2,09
Муравьиная кислота		298	2,28
Нафталин		280	1,19
Толуол		298	1,85
1, 2, 4-Трихлорбензол		313	2,39
		280	1,34
Уксусная кислота		298	2,09
Бензойная кислота	Ацетон	298	2,62
Бромоформ		293	2,73
Вода		298	4,56
Муравьиная кислота		298	3,77
Уксусная кислота		288	2,92
		298	3,31
		313	4,04
Бромбензол	*н*-Гексан	280	2,60
н-Гексан		298	4,21
Додекан		298	2,73
Метилэтилкетон		303	3,74
Пропан		298	4,87
Тетрахлорметан		298	3,70
Толуол		298	4,21
Азобензол (0,2)	Этиловый спирт	293	0,74
Аконикотин (0,04)		293	0,27
Аллиловый спирт (1)		293	0,95
Амиловый спирт		293	0,98
Изоамиловый спирт		293	0,81
Ацеталь (1)		293	1,13
Ацетамид		293	0,67
Ацетоин		293	0,56
Бромнафталин (0,05)		293	0,74
Бромоформ		293	0,97
Бруцин (0,06)		293	0,28
Вода		298	1,24
Гидрохинон		293	0,49
Двуокись углерода		290	3,2
Иод		298	1,32
Иодбензол		293	1,00
Камфара		293	0,70
Кислород		303	2,64
Мочевина		285	0,54
Пиридин		293	1,10
Резорцин		293	0,45
Салигенин		293	0,61
Стеариновая кислота (0,2)		293	0,59
Тетрахлорметан		298	1,50
Фенол (0,1)		293	0,80
Хлораль (1)		293	0,61
Хлороформ (1)		293	1,25
Бромбензол	Уксусная кислота	293	1,58
Бромбензол (0,1)		280	3,25
Иод		280	1,51
Иод (0,1)		289	3,60

Продолжение табл. 17.16

Растворимое вещество	Растворитель	T, К	D, 10^{-5} см²/с
Бромоформ	Эфир этиловый	290	3,30
Нитробензол		281	3,24
Фенол		292	3,60
α-Бромнафталин	Эфир дибензиловый	280	0,149
Адипиновая кислота	*н*-Бутиловый спирт	303	0,40
Бензол		298	1,0
Винная кислота		303	0,40
Вода		298	0,56
Дифенил		298	0,63
н-Дихлорбензол		298	0,82
Масляная кислота		303	0,51
Метиловый спирт		303	0,59
Олеиновая кислота		303	0,25
Пропан		273	1,02
		298	1,57
н-Пропиловый спирт		303	0,40
Ацетон	Этилацетат	293	3,18
Вода		298	3,20
Иод (0,1)		293	2,15
Метилэтилкетон		303	2,93
Нитробензол		293	2,25
Уксусная кислота		293	2,18
Этилбензол		293	1,85
Бензол	Гептан	298	3,40
		318	4,40
		338	6,05
Иод (0,1)		372	8,40
Иод (0,1)	Анизол	293	1,13
Бромбензол	Декалин	280	0,47
α-Бромнафталин		280	0,34
Бром	Сероуглерод	292	3,40
Фенол		292	0,20
Фенол	Изоаллиловый спирт	292	0,20
Бромбензол	Тетралин	280	0,48
α-Бромнафталин		280	0,36
Тетрабромэтан (0,06)	Тетрахлорэтан	323	0,94
Бромбензол	Толуол	280	1,59
Иод (0,1)		293	1,59
Иод (0,1)	Углерод четыреххлористый	293	1,36
Бромбензол	Этилбензол	280	1,44

Таблица 17.17. **Коэффициент диффузии веществ в расплавленных солях [7]**

Диффундирующее вещество	Среда	T, К	D, 10^{-5} см²/с
$AgNO_3$	KNO_3	630	4,56
	KNO_3	660	4,86
	$NaNO_3$	600	4,57
	$NaNO_3$	630	5,06
AgBr	KBr	1050	4,92
AgCl	KCl	1000	4,63
	KCl	1050	5,10

Продолжение табл. 17.17

Диффундирующее вещество	Среда	T, К	D, 10^{-5} см²/с
	KCl, LiCl	750	5,61
	KCl, LiCl	1000	6,61
$Ba(NO_3)_2$	KNO_3	640	2,06
	$NaNO_3$	630	3,71
KBr	KNO_3	630	3,01
KCl	KNO_3	630	2,96
$PbCl_2$	KCl, LiCl	800	2,06
	KCl, LiCl	1000	4,40
$NaNO_3$	KNO_3	630	5,22
$Sr(NO_3)_2$	KNO_3	630	2,81
	$NaNO_3$	620	4,17
TlBr	KBr	1040	4,28
TlCl	KCl, LiCl	800	3,10
	KCl	800	3,14
$TlNO_3$	KNO_3	620	3,17
$TlNO_3$	Na_2NO_3	630	4,31

Таблица 17.18. **Коэффициент диффузии веществ в бензоле, 10^{-5} см²/с ($T = 288$ К, молярная концентрация раствора 1 %) [5]**

Растворенное вещество	D	Растворенное вещество	D
Альдегид салициловый	1,78	Метилсалицилат	1,56
Ацетилдифениламин	0,90	Нафталин (1%)	1,19
Бензальдегид	1,73	Нитробензол	1,84
Бром (0,1 М, 285 К)	2,00	α-Нитронафталин	1,39
Броманилин	1,41	Спирт:	
Бромбензол	1,86	изоамиловый	1,48
α-Бромнафталин	1,30	пропиловый	1,60
Бромнитробензол	1,33	1, 2, 4, 5-Тетрахлорбензол (<1%, 281 К)	1,24
Бромоформ (291К)	1,62		
Бромфенол	1,34	Тринитротолуол	1,39
Дексахлорбензол (< 1%, 281 К)	1,02	2, 4, 6-Тринитрофенол	1,39
н-Дибромбензол	1,37	1, 2, 4-Трихлорбензол (< 1 %, 281 К)	1,34
Дибромнафталин	1,25		
мета-Динитробензол	1,54	1, 2, 3-Трихлорпропан	1,72
Динитронафталин	1,23	Фенантрен (1 %, 281 К)	0,95
н-Дихлорбензол	1,90	Фенол (278 К)	1,27
Дихлорнафталин	1,40	Хинон	1,68
Иод (0,05 М, 293К)	1,95	Хлоранилин	1,56
Иодбензол (1%, 281 К)	1,35	Хлорбензол	1,42
Иодоформ	1,38	α-Хлорнафталин	1,20
Кислота:		Хлорнитробензол	1,70
бензойная	1,36	Хлороформ	2,11
фталевая	1,37	Хлорфенол	1,42
хлоруксусная	1,48	Этилен:	
		бромистый	1,97
		иодистый	1,40
		Эфир этиловый	2,21

Таблица 17.19. **Коэффициент диффузии атомов металлов в амальгамах, 10^{-5} см^2/с [7]**

Металл	T, К	D	Металл	T, К	D
Li	298	0,93	Zn	298	2,4
Na	298	0,86	Cd	298	2,0
K	298	0,71	Sn	298	2,1
Rb	280	0,53	Bi	298	1,5
Cs	298	0,64	Pb	298	2,1
Ag	289	1,11	Ba	281	0,60
Au	298	0,73	Sr	283	0,54
Tl	298	1,18	Ca	283	0,62

Таблица 17.20. **Коэффициент диффузии в расплавленных металлах [8]**

Диффундирующий металл	Диффузионная среда	T, К	D, 10^{-5} см^2/с
Mg	Al	1000	7,54
Au	Bi	800	5,22
Si	Fe	1750	2,4
Si	Fe	1830	10,8
Rh	Pb	800	3,52
Pt	Pb	760	1,95
Ag	Sn	800	4,8
Au	Sn	800	5,37
Pb	Sn	800	3,68

Таблица 17.21. **Параметры выражения (17.13) для коэффициента самодиффузии металлов [8]**

Металл	Температурный интервал, К	D_0, см^2/с	Q, кДж/моль	Металл	Температурный интервал, К	D_0, см^2/с	Q, кДж/моль
Ag	700—1200	0,81	191	Cd, $\perp$	380—490	0,10	80
Al	600—700	0,10	128	Cd, $\parallel$	380—490	0,05	76
	700—900	1,7	143	Mg, $\perp$	740—900	1,5	136
Au	900—1200	0,031	165	Mg, $\parallel$	740—900	1,0	135
	1100—1300	0,11	177	α-Ti	960—1100	$6{,}4\cdot10^{-8}$	123
Co	1050—1300	0,5	274	β-Ti	1170—2850	0,0016	146
	1300—1600	0,2	260	α-Tl, $\perp$	420—560	0,4	94,5
Cu	800—1300	70	235		470—690	0,39	104
	1000—1200	120	278	α-Tl, $\parallel$	470—690	0,08	92
α-Fe	1200—1500	3,6	298	α-Zr	600—1000	$5\cdot10^{-8}$	92
γ-Fe	1350—1600	1,1	284		900—1100	$5\cdot10^{-2}$	218
	1700—1800	6,8	259	β-Zr	1200—1800	0,0024	159
δ-Fe	1000—1400	0,48	276	Cr	1200—1500	10^{-4}	221
Ni	1300—1700	1,9	285		1500—1900	0,28	309
Pb	450—600	0,28	102	Hf	2070—2300	0,0012	162
Pd	1300—1800	0,20	267	Li	208—520	0,24	55,2
Pt	1500—2000	0,22	279	Mo	2000—2200	2,8	465
δ-Pu	310—700	0,0045	100		2100—2600	0,3	398
α-Th	1400—1700	700	350	Na	208—520	0,2	41,9
β-Th	1700—1800	10^5	417	Nb	1150—2700	1,1	402
Be, $\perp$	800—1300	0,52	158	ε-Pu	800—900	0,027	77,4
Be, $\parallel$	800—1300	0,62	165	Rb	208—520	0,23	39,4
Ta	1500—2400	0,12	413	W	1560—1730	$6{,}3\cdot10^7$	570
	2100—2800	2	462		2300—3000	0,54	502
α-U	850—920	0,002	168		2900—3600	43	640
β-U	970—1020	0,014	176	In, $\perp$	320—420	3,7	78,2
γ-U	1050—1300	0,002	113	In, $\parallel$	320—420	2,7	78,2
V	1150—1600	0,36	308	β-Sn, $\perp$	430—500	10,7	110
	1600—2100	210	394	β-Sn, $\parallel$	430—500	7,7	107
La	930—1120	1,5 [10]	189 [10]	Cs	1100—1300	47	25,7
Pr	1100—1200	0,087 [10]	123 [10]		1000—1200	11	23,9
Sb, $\perp$	770—900	0,10	150	K	220—330	0,16	3,92
Sb, $\parallel$	770—900	56	201				

Таблица 17.22. **Параметры выражения (17.13) для коэффициента самодиффузии в некоторых кристаллах**

Кристалл	Ar	C (графит)	Ge	α-P белый	Xe
T, К	78	2270—2620	1000—1200	273—303	121—158
D_0, см^2/с	350	10	10,8	$1{,}1\cdot10^{-3}$	7,3
Q, кДж/моль	17,4	680	291	39,3	34,9

Таблица 17.23. **Параметры выражения (17.13) для коэффициента диффузии малой примеси в серебре [8]**

Примесь	T, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
Fe	718—927	2,42	205
Co	—	104	251
Ni	750—950	21,9	230
Cu	700—950	1,23	193
Zn	640—925	0,54	174
Ge	—	0,084	153
Ru	794—945	180	276
Pd	735—939	9,57	238
Ag	450—900	0,81	191
Cd	592—937	0,44	175
In	592—937	0,41	170
Sn	592—937	0,25	164
Sb	468—942	0,17	160
Au	650—950	0,26	191
Hg	650—950	0,08	160
Tl	650—800	0,15	159
Pb	700—825	0,22	160

Таблица 17.24. **Параметры выражения (17.13) для диффузии малой примеси в меди [8]**

Примесь	T, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
Fe	719—1074	1,4	217
Co	701—1077	1,93	226
Ni	743—1076	2,7	237
Cu	500—1000	70	234
Zn	<1356	0,34	191
Ga	<1356	0,55	192
As	<1356	0,12	176
Pd	807—1056	1,71	228
Ag	<1356	0,63	195
Cd	<1356	0,93	189
Sb	600—1000	0,34	176
Au	700—1000	0,15	192
Hg	<1356	0,35	184
Tl	785—996	0,71	181

Таблица 17.25. **Параметры выражения (17.13) для коэффициента диффузии малой примеси в золоте [8]**

Примесь	T, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
Fe	700—950	0,082	174
Co	700—950	0,068	174
Ni	700—950	0,034	176
Ag	700—1000	0,072	168
Au	700—1050	0,091	175
Pt	800—1050	7,6	255
Hg	500—1030	0,116	157

Таблица 17.26. **Параметры выражения (17.13) для коэффициента диффузии малой примеси в никеле [8]**

Примесь	T, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
Mg	1070—1250	$2{,}3\cdot10^{-5}$	131
	1400—1600	0,44	235
Al	1070—1250	1,1	249
	1400—1600	1,87	268
Si	1070—1250	10,6	271
	1400—1600	1,5	258
Ti	1400—1600	0,86	257
Cr	940—1170	0,03	171
	1400—1600	1,1	273
Mn	1400—1600	7,5	281
Fe	1200—1800	0,8	255
Co	1020—1460	0,75	271
	1430—1650	1,11	272
Cu	1320—1620	0,57	258
Mo	1400—1600	3	288
W	1400—1600	11,1	322
Au	1200—1400	2	272

Таблица 17.27. **Параметры выражения (17.13) для диффузии различных примесей в металлах III и IV групп. В скобках указаны индексы Миллера, характеризующие направление диффузионного потока [10]**

Металл	Примесь	Диапазон температур, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
Pb	Cu	>500	$7{,}9\cdot10^{-3}$	33,5
	Ag	>400	$4{,}6\cdot10^{-2}$	60,3
		390—570	$7{,}5\cdot10^{-2}$	63,6
	Au	460—570	$4{,}1\cdot10^{-3}$	39,1
		460—600	$8{,}7\cdot10^{-3}$	41,9
	Zn	450—570	$1{,}6\cdot10^{-2}$	47,3
	Cd	>420	0,41	88,9
	Hg	470—570	1,05	95
	Tl	480—600	0,5	104
	Sn	510—560	0,16	96,5
	Na	520—490	6,3	119
	Ni	480—870	$9{,}4\cdot10^{-3}$	44,4
	Pd	480—860	$3{,}8\cdot10^{-3}$	36
Sn	Cu	410—500	$2{,}4\cdot10^{-3}$	33,1
	Au [001]	400—510	$5{,}8\cdot10^{-3}$	46
	[100]	400—510	0,16	74,1
	Ag [001]	400—510	$7{,}1\cdot10^{-3}$	51,5
	[100]	400—510	0,18	77
	Zn	360—510	$5{,}9\cdot10^{-3}$	49,4
	Cd [001]	460—500	220	118
	[100]	460—500	120	113
	Hg [001]	450—500	7,5	106
	[110]	450—500	30	112
	In [001]	450—500	12	107
	In [100]	450—500	34	108
	Sb [001]	470—500	79	122
	[100]	470—500	77	123
In	Au	300—420	$9\cdot10^{-3}$	281
	Ag	300—420	0,11	48,2
Tl	Ag	360—500	0,033	48,2
	Au	390—500	$5{,}3\cdot10^{-4}$	21,8
β-Al	Na^+	470—670	$2\cdot10^{-4}$	15,9
	Ag^+	470—670	$1{,}65\cdot10^{-4}$	16,8
	K^+	470—670	$0{,}78\cdot10^{-4}$	22,4
	Rb^+	470—670	$0{,}34\cdot10^{-4}$	30,1
	Li^+	470—670	$14{,}5\cdot10^{-4}$	36,4
	Tl^+	470—670	$0{,}65\cdot10^{-4}$	34,4

Таблица 17.28. **Параметры выражения (17.13) для диффузии атомов примесей в щелочных металлах [10]**

Металл	Примесь	Диапазон температур, K	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
Li	Cu	320—450	0,47	38,6
	Ag	340—430	0,12	52,8
	Au	320—420	0,21	46,1
	Zn	330—450	0,57	54,5
	Na	330—450	0,41	52,8
K	Au	280—326	1300	12,4
Na	Au	270—350	3,3	9,2

Таблица 17.29. **Параметры выражения (17.13) для диффузии атомов примеси в лантанидах и актинидах [10]**

Металл	Примесь	Интервал температур, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
La	Au	980—1070	0,022	75,8
Pr	Cu	930—1060	0,084	75,8
		1090—1190	0,057	74,5
	Co	880—1040	0,047	68,7
	Au	880—1020	0,043	82,5
		1070—1180	0,033	84,1
	Ag	880—1040	0,14	106
		1070—1190	0,032	90,0
	Zn	880—1040	0,18	104
		1100—1200	0,63	113
γ-U	Co	1050—1350	$3{,}5\cdot10^{-4}$	52,8
	Fe	1050—1350	$2{,}7\cdot10^{-4}$	50,2
	Ni	1050—1350	$5{,}4\cdot10^{-4}$	65,8
	Mn	1050—1350	$1{,}8\cdot10^{-4}$	58,2
	Cr	1050—1350	$5{,}4\cdot10^{-3}$	103
	Cu	1050—1350	$2\cdot10^{-3}$	101
	Nb	1050—1350	0,049	166

Таблица 17.30. **Параметры температурной зависимости коэффициента диффузии малой примеси в β-Ti [8]**

$$D = D_{01}\exp(-Q_1/RT) + D_{02}\exp(-Q_2/RT)^*$$

Примесь	T, К	D_{01}, 10^{-4} см²/с	Q_1, кДж/моль	D_{02}, 10^{-4} см²/с	Q_2, кДж/моль
Ti	1170—1800	2	125	1,0	250
P	1220—1900	36,2	101	5	237
Sc	1200—1560	21	137	34	—
V	1200—1820	10	146	3,4	258
Cr	1220—1900	74	154	14	274
Mn	1200—1900	76	144	12	270
Fe	1200—1900	80	126	15	254
Co	1200—1900	130	130	16	257
Ni	1200—1900	170	133	20	252
Nb	1270—1900	13	146	9,5	291
Mo	1170—1900	7	155	3,6	272
Sn	1230—1870	3,8	132	9,5	291
Ta	1300—1900	7,2	151	50	335

* При низких температурах преобладает первый член выражения, при высоких — второй.

Таблица 17.31. **Параметры выражения (17.10) для коэффициента взаимной диффузии металлов и сплавов. Прочерки означают, что концентрация примеси исчезающе мала [1]**

Диффундирующий элемент	Диффузионная среда	Атомная концентрация диффундирующего элемента, %	T, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
Ag	Al	1,26	740—850	1,1	137
	Au	9	1120—1270	$2{,}9\cdot10^{-2}$	159
	Cu	3	1000—1070	$2{,}9\cdot10^{-2}$	156
	Pb	0,12	500—560	$7{,}4\cdot10^{-2}$	64
Al	Cu	15—21	770—1120	$7{,}1\cdot10^{-2}$	164
Au	Ag	100	500—870	$5{,}3\cdot10^{-4}$	125
		18,4	1040—1200	$1{,}1\cdot10^{-4}$	112
	Cu	2,4—3,5	670—1250	$6{,}8\cdot10^{-6}$	94
	Pb	0,03—0,09	370—570	0,35	59,5
B	α-Fe	—	<1800	10^5	260
Bi	Pb	2,0	500—560	$1{,}8\cdot10^{-3}$	77
C	Fe	Карбонизация	1100—1400	$1{,}67\cdot10^{-2}$	120
		1,1 мас. %	1200—1500	0,49	153
		0.1—1 мас. %	1000—1500	0,12	137
	α-Fe	—	<1800	$7{,}9\cdot10^{-3}$	76
		—	<1800	$2\cdot10^{-2}$	84
Cd	Ag	2,0	920—1170	$4{,}9\cdot10^{-5}$	94

Диффундирующий элемент	Диффузионная среда	Атомная концентрация диффундирующего элемента, %	T, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
		—	⩽1200	0,44	175
	Cu	3	1000—1130	$3{,}04\cdot10^{-4}$	99
	Pb	1,6	440—520	$1{,}83\cdot10^{-3}$	65
Co	α-Fe	—	⩽1800	0,4	226
	γ - Fe	—	⩽1800	$1{,}2\cdot10^{5}$	435
	Сталь	—	⩽1800	90	335
Cr	α-Fe	—	⩽1800	$3\cdot10^{4}$	343
	γ-Fe	—	⩽1800	$1{,}8\cdot10^{4}$	406
	Сталь	—	⩽1800	10	314
Cs	W	I-й адсорбционный слой	300—700	0,2	58,6
		2-й адсорбционный слой	300—700	$1{,}64\cdot10^{-2}$	96
Cu	Ag	2,0	920—1170	$5{,}9\cdot10^{-5}$	104
	Al	Эвтектика	700—800	2,3	146
		0,085—0,17	730—840	$8{,}4\cdot10^{-2}$	137
	Au	100	570—890	$1{,}06\cdot10^{-3}$	115
		25,6	700—1000	$5{,}8\cdot10^{-4}$	115
	Ge	—	⩽1200	$1{,}9\cdot10^{-4}$	172
	Pt	13,9	1310—1730	$4{,}8\cdot10^{-2}$	233
	β-латунь (45 % Zn)	—	⩽1100	$3{,}8\cdot10^{-2}$	104
Fe	Au	18,3	1030—1280	$1{,}16\cdot10^{-4}$	102
	Fe—20 %	—	⩽1800	$18\cdot10^{-0{,}92\,[C]}$*	314 [*C*]
	Ni—C	—	⩽1800	$71\cdot10^{-0{,}65\,[C]}$	314 [*C*]
	Ni	—	⩽1800	$8{,}4\cdot10^{-3}$	214
	W	0,04	2200—2800	11,5	586
Ge	Ge	Самодиффузия	⩽1200	87	308
Hg	Cd	4	430—475	2,6	82
In	Ag	20	920—1170	$7{,}3\cdot10^{-5}$	102
Li	Ge	—	⩽1200	$2{,}5\cdot10^{-3}$	49,4
	Si	—	⩽1700	$2{,}3\cdot10^{-3}$	63,6
Mg	Al	Эвтектика	640—710	$1{,}5\cdot10^{-2}$	161
		5,5—11,0	670—850	$0{,}1\cdot10^{-1}$	119
Mn	Cu	8—11,4	670—1120	$7{,}2\cdot10^{-6}$	96
Mo	W	Монокристалл	1800—2530	$6{,}3\cdot10^{-4}$	33,7
		Поликристалл	1800—2530	$5\cdot10^{-3}$	33,7
N	Fe	—	⩽1800	$3{,}1\cdot10^{-3}$	75
		—	⩽1800	$3\cdot10^{-3}$	76
		—	⩽1800	$6{,}6\cdot10^{-3}$	78
	Th	—	⩽1970	$2{,}1\cdot10^{-3}$	94
	α-Ti	—	⩽1940	$1{,}2\cdot10^{-2}$	190
	β-Ti	—	⩽1940	0,35	142
Ni	Au	15,0	1070—1280	$1{,}74\cdot10^{-3}$	131
	Cu	7,5—11,8	820—1220	$6{,}5\cdot10^{-5}$	125
	Pt	14,9	1320—1670	$7{,}8\cdot10^{-4}$	181
O	β-Ti	—	⩽1940	1,6	202
Pd	Ag	20,2	720—1200	$6{,}4\cdot10^{-6}$	84,5
	Au	17,1	1000—1250	$1{,}13\cdot10^{-3}$	91,5
	Cu	4,3—6,2	760—1240	$1{,}6\cdot10^{-6}$	163
Pt	Au	20,1	1000—1250	$1{,}24\cdot10^{-3}$	163
	Cu	2,4—3,5	760—1230	$1{,}0\cdot10^{-6}$	91,5
Sb	Ag	2,0	920—1170	$5{,}3\cdot10^{-5}$	91
Si	Al	0,5	740—870	0,9	128
Sn	Ag	20	920—1170	$7{,}8\cdot10^{-6}$	89,5
	Cu	3,9—5,6	670—1120	$4{,}1\cdot10^{-3}$	131
β-Sn	Pb	2,0	510—560	4,0	110
Th	W	Диффузия на границе между зернами	2050—2500	1,13	394
		Объемная диффузия	2400	1,0	503
		Поверхностная диффузия	1650	0,47	278
Tl	Pb	2,0	500—550	$2{,}5\cdot10^{-2}$	81
U	*W*	—	2000	1,14	420

Продолжение табл. 17.31

Диффундирующий элемент	Диффузионная среда	Атомная концентрация диффундирующего элемента, %	T, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
W	α-Fe	—	<1800	380	293
	γ-Fe	—	<1800	10^3	377
	Сталь	—	<1800	13	314
Y	W	—	2000	0,11	260
Zn	Zn	Самодиффузия в Zn чистотой 99,999 %	<690	0,22	60
		Самодиффузия в Zn чистотой 99,99 %	<690	0,38	61
	Al	0,84	690—730	12	116
	Cu	6,8—9,7	630—1150	$3\cdot10^{-6}$	82,5
		3	1000—1130	$3{,}7\cdot10^{-6}$	92
		0—28,6	910—1150	$3{,}2\cdot10^{-3}$	176
	β-латунь (45 % Zn)	—	<1100	0.024	95,5
Zr	W	—	2000	1,1	326

* [C] — атомная концентрация углерода, %.

Таблица 17.32. **Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии ионов в кристаллах солей [10]**

Ион	Соль	Диапазон температур, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
Li^+	LiF	850—1000	0,8	192
		1000—1100	5,6	289
Na^+	NaCl	550—820	$3{,}5\cdot10^{-6}$	81,2
		860—1070	76,9	196
Na^+	NaBr	770—950	0,67	147
K^+	KF	870—1100	2	172
K^+	KCl	800—950	137	207
		860—1020	$1{,}8\cdot10^{-5}$	76
K^+	KBr	730—1000	0,01	122
K^+	KI	730—950	10^{-5}	62
Rb^+	RbCl	840—970	33,3	193
Cs^+	CsCl	630—730	1,1	130
		760—880	0,1	134
Cs^+	CsI	570—770	80	158
Cl^-	NaCl	770—1020	60,7	206
Br^-	NaBr	920—1020	1,0	164
Cl^-	KCl	770—1010	178	216
Br^-	KBr	670—970	10^{-3}	196
I^-	KI	730—950	$1{,}2\cdot10^{-3}$	108
Cl^-	RbCl	870—970	33,3	193
Cl^-	CsCl	550—730	1,51	122
		760—880	0,7	152
I^-	CsI	680—830	0,39	122

Таблица 17.33. **Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии примесей в кристаллах солей [10]**

Кристалл	Примесь	Диапазон температур, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
NaF	Li	850—1000	0,8	192
		1000—1100	5,6	290
NaCl	K	670—930	—	48,3

Продолжение табл. 17.33

Кристалл	Примесь	Диапазон температур, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
	Rb	870—1020	28,5	192
	Cs	870—970	1,62	192
	Cu	620—920	33,8	138
	Ag	850—1000	380	192
	Br	770—920	20	187
	I	800—970	500	216
	Ca	700—1020	$6\cdot10^{-4}$	87
	Sr	390—1070	$1{,}7\cdot10^{-3}$	126
	Cd	800—930	$3{,}9\cdot10^{-3}$	251
	Mn	670—970	10^{-4}	65
	Zn	810—1000	0,04	94,5
	Pb	600—800	0,015	94,5
	Co	880—1030	$8\cdot10^{-3}$	106
	Ni	900—1020	0,02	125
	Hg	720—820	$8{,}2\cdot10^{-5}$	55
	Au	—	0,2	103
NaI	Tl	670—910	$5\cdot10^{-3}$	113
KBr	Tl	410—480	0,091	96,5
		620—770	50	192
	Pb	550—670	$1{,}5\cdot10^{-3}$	87,5
KCl	Li	770—1000	20	142
	Na	860—1020	2,2	169
KCl	Rb	880—1040	26,8	195
	Cs	840—1020	0,7	169
	Tl	500—730	$5{,}8\cdot10^{-11}$	23
		730—1000	$1{,}3\cdot10^{-3}$	126
	Cu	620—920	10,6	118
	Ag	470—920	—	40,6
	I	770—920	50	193
	OH	670—890	$1{,}2\cdot10^3$	193
	Cl	770—920	$1{,}5\cdot10^{-3}$	109
	Cd	620—770	$4{,}7\cdot10^{-5}$	52,5
	Pb	500—750	10^{-3}	96,5
	Eu	700—820	0,064	124
	Co	470—920	—	19,3
	Bi	670—950	$5{,}6\cdot10^{-3}$	94
	Ce	770—970	$1{,}1\cdot10^{-3}$	100

Таблица 17.34. **Параметры соотношеиия (17.13) для коэффицнента диффузни иона Ag^+ в кристаллах [1]**

Диффузионная среда	T, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
α-AgI	454—744	—	9,45
α-CuI	685—753	$4{,}5\cdot10^{-3}$	28,3
α-Cu_2S	586—1192	$3{,}3\cdot10^{-4}$	19,1
α-Cu_2Te	603—794	2,4	87
α-AgI	451—701	$1{,}6\cdot10^{-4}$	9,45
α-Ag_2S	443—693	$4{,}6\cdot10^{-4}$	13,3
α-Ag_2Se	421—673	$1{,}6\cdot10^{-4}$	12,3
α-Ag_2Te	428—678	$3{,}8\cdot10^{-5}$	11,1
α-Ag_2I	473—653	$5{,}8\cdot10^{-3}$	19,1
NaCl	<550	1,6	75
	>550	3,1	174
$PbCl_2$	439—743	7,7	154
PbI_2	387—438	7,8	126
	528—588	10,6	127
PbS	733—1043	1,3	176
NaBr	—	50	199
α-Ag_2Se	—	$6{,}7\cdot10^{-4}$	85,5

Таблица 17.35. **Коэффициент диффузии ионов в кристаллах при разлнчных температурах [1]**

Диффундирующий ион	Диффузионная среда	T, К	Q, 10^{-6} см²/с
Ag^+	CuBr	518	51
Cu^+	α-Cu_2S	503	1,85
		603	4,6
		693	9,4
	α-Cu_2Te	603	0,359
		749	1,98
		794	4,66
	Cu_3Sb	723	0,139
Li^+	AgCl	511	0,24
	α-AgI	753	37—41
	α-Ag_2S	443	0,4
		503	4,1
		603	6,3
		693	16,5
Na^+	AgCl	723	0,116
	AgBr	573	0,023
Pb^{++}	$PbCl_2$	473	4,5
		523	11
		578	15
		653	23
Pb^{++}	PbI_2	387	$7{,}3\cdot10^{-11}$
		420	$1{,}35\cdot10^{-9}$
		438	$7{,}35\cdot10^{-9}$
Cl^-	AgI	453	$1{,}1\cdot10^{-4}$
Se^{2-}	Cu_2S	844	$1{,}1\cdot10^{-3}$
		967	$4{,}9\cdot10^{-3}$

Таблица 17.36. **Коэффициент взаимной диффузии твердых солей [1]**

Диффундирующее вещество	Диффузионная среда	T, К	D, 10^{-11} см²/с
Ag (из $AgNO_3$)	Na-стекло	627	25,2
	Na-пермутит	627	14,8
Ag_4Sn	Cu_4Sn	723	231
$BaMoO_4$	$BaWO_4$	1223	9,61
$BaWO_4$	$BaMoO_4$	1223	3,47
$MgMoO_4$	$MgWO_4$	1073	2,31
$MgWO_4$	$MgMoO_4$	1073	1,39
$SrMoO_4$	$SrWO_4$	1223	9,14
$SrWO_4$	$SrMoO_4$	1223	3,01
$ZnMoO_4$	$ZnWO_4$	1073	3,94
		1123	6,36
$ZnWO_4$	$ZnMoO_4$	1073	1,00
		1123	2,89

Таблица 17.37. **Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии газов в твердых телах [1]**

Диффундирующий газ	Диффузионная среда	T, К	D_0, 10^{-6} см²/с	Q, кДж/моль
H_2	SiO_2	473	8,5	42,7
		773	11	42,7
He	SiO_2	293	5,7	23
		773	2,9	23
	Пирекс	293	1,3	36,4
NH_3	Анальцим*	773	5,5	—

* Природный алюмосиликат.

Таблица 17.38. **Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии атомов водорода и его изотопов в металлах [9]**

Атом	Металл	T, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
H	Pd	<900	$2{,}9\cdot10^{-3}$	22,2
H	Ni	>631	$6{,}9\cdot10^{-3}$	40,5
		<631	$4{,}8\cdot10^{-3}$	39,4
H	α-Fe	<1800	$7{,}5\cdot10^{-4}$	10
H	Nb	>273	$5{,}0\cdot10^{-4}$	10,2
		<223	$0{,}9\cdot10^{-4}$	6,5
D	Nb	<1000	$5{,}2\cdot10^{-4}$	12,3
T	Nb	<1000	$4{,}5\cdot10^{-4}$	13
H	Ta	>273	$4{,}4\cdot10^{-4}$	13,5
		<200	$2\cdot10^{-6}$	3,85
D	Ta	<600	$4{,}6\cdot10^{-4}$	15,5
H	V	<600	$3{,}1\cdot10^{-4}$	4,36
D	V	<600	$3{,}8\cdot10^{-4}$	7,12
H	Cu	600—1100	$3{,}5\cdot10^{-4}$	39,5
D	Cu	800—1100	$2{,}5\cdot10^{-4}$	39,2
T	Cu	800—1100	$2\cdot10^{-4}$	39,2

Таблица 17.39. **Параметры соотношения (17.13) для коэффициента диффузии атомов инертных газов в кристаллах солей [10]**

Кристалл	Газ	Диапазон температур, К	D_0, см²/с	Q, кДж/моль
KCl	Ar	>670	$7{,}9\cdot10^{-4}$	36,7
	Kr	450—520	$8\cdot10^{-5}$	107
		520—770	10^6	203
KBr	Ar	290—570	10^5	145
	Xe	290—570	10	135
KI	Xe	420—770	1,5	98
RbF	Kr	570—1000	2,5	132
RbCl	Kr	630—970	$7{,}9\cdot10^4$	43
RbBr	Kr	460—600	$4\cdot10^7$	163
		>600	$5\cdot10^{-4}$	28,9
RbI	Kr	450—610	$1{,}3\cdot10^6$	136
		>610	$1{,}6\cdot10^{-3}$	29,4
	Xe	420—770	0,082	89,5
CsF	Xe	720—870	10^2	19,3
CsCl	Xe	620—740	0,1	86,6
		740—920	0,1	83,5
CsBr	Xe	530—850	100	140
CsI	Xe	420—770	0,57	96

Таблица 17.40. **Параметры выражения (17.13) для коэффициента диффузии атомов примеси в полупроводниках [11]**

Полупроводник	Диффундирующее вещество	D_0, см²/с	Q, кДж/моль	Диапазон температур, К
Ge	Li	0,0012	49,2	900—1200
	Cu	0,0033	17,4	900—1200
	Ag	0,044	96,5	900—1200
	Au	0,055	242	1000—1200
	Zn	3,3	247	900—1200
	B	0,084	444	1000—1200
	Ga	20	320	1000—1200
	Al	0,05	261	1000—1200
	In	0,048	231	1000—1200
	Ge	49	209	1000—1200
	Sn	0,017	183	1000—1200
	Pb	—	348	1000—1200
	P	1,3	240	1000—1200
	As	4,5	232	900—1200
	Sb	3,6	232	1000—1200
	Fe	0,13	106	1000—1200
	Ni	0,42	87	900—1200
	O	0,17	195	900—1200
	He	0,0061	68	900—1200
	H	0,0027	36,7	1000—1200
	Ta	$2{,}5\cdot10^{-6}$	112	900—1200
	Be	0,5	242	900—1200
	Co	0,16	106	900—1200
	N	—	249	900—1200
	Bi	—	234	900—1200
Si	H	0,0094	46,3	1240—1480
	Li	0,0025	63,6	300—400
		0,0023	62,7	700—1100
	Cu	0,0047	41,5	670—970
		0,4	96,5	1100—1400
	Ag	0,002	154	1400—1600
	Au	0,0011	106	1100—1500
	Na	0,0016	69	800—1100
	K	0,0011	72,5	800—1060
	Zn	0,1	135	1250—1550
	B	$6\cdot10^{-7}$	163	1000—1400
	Al	4,8	323	1400—1700
	Ga	90	376	1300—1600
	In	18	374	1300—1600
	Te	16,5	375	1300—1600
	C	0,33	282	1350—1700
	Si	$5{,}4\cdot10^3$	483	1400—1700
	Ge	$6{,}3\cdot10^5$	510	1400—1700
	P	20	364	1300—1600
	As	34	376	1300—1600
	Sb	9,2	380	1300—1600
	Bi	10^3	444	1300—1600
	O	0,21	292	1300—1600
	S	0,92	212	1300—1600
	Cr	0,01	96,5	1200—1500
	Fe	0,0062	83	1300—1600
	He	0,11	121	1300—1600
Te	Tl	320	172	630—700
	Se	260	120	590—700
	Hg	$3{,}4\cdot10^{-5}$	78	640—700
	Te	$3{,}5\cdot10^{-4}$	96,5	600—700
Se	Fe	10^{-5}	37,5	490
	Zn	$3{,}8\cdot10^{-7}$	28	490
	S	4,9	26	490
	Ge	$9{,}4\cdot10^{-6}$	38,6	490
	Te	$5{,}4\cdot10^{-6}$	39,6	490
	Se	$2{,}8\cdot10^{-8}$	28	490
	Tl	$1{,}4\cdot10^{-6}$	33,8	490
	Sn	$4{,}8\cdot10^{-8}$	37,6	490
	In	$5{,}2\cdot10^{-6}$	30,9	490
AlSb	Al	—	174	—
	Sb	—	145	—
	Zn	0,33	186	930—1130
	Cu	0,0035	34,5	420—770
InAs	In	$6\cdot10^5$	386	1000—1200
	As	$3\cdot10^7$	432	1000—1200
	Cu	0,036	51	1200
	Ag	$7{,}3\cdot10^{-4}$	25	730—1200
	Au	0,0058	62,8	900—1200
	Mg	$2\cdot10^{-6}$	113	900—1200
	Zn	0,0037	104	900—1200
	Cd	$6\cdot10^{-4}$	112	900—1200
	Ge	$3{,}7\cdot10^{-6}$	113	900—1200
	Sn	$1{,}5\cdot10^{-6}$	113	900—1200
	S	6,8	212	900—1200
	Se	13	212	900—1200
	Te	$3{,}4\cdot10^{-5}$	124	900—1200
	P	130	261	920—1170

Продолжение табл. 17.40

Полупроводник	Диффундирующее вещество	D_0, см²/с	Q, кДж/моль	Диапазон температур, К
GaSb	Ga	3200	304	930—970
	Sb	0,0087	109	600—920
	Sb	34000	333	920—970
	Sn	$2{,}4\cdot10^{-5}$	77,4	600—920
	Te	$3{,}8\cdot10^{-4}$	116	600—920
	Cd	$1{,}5\cdot10^{-6}$	69,5	770—900
	Li	$2{,}3\cdot10^{-4}$	184	1070
InP	In	10^{5}	373	1120—1270
	P	$7\cdot10^{10}$	545	1120—1270
	Au	$1{,}3\cdot10^{-5}$	463	870—1100
	Ag	$3{,}6\cdot10^{-4}$	57	800—1200
	Cu	30	66,5	900—1200
	Cd	$1{,}1\cdot10^{-7}$	70	1000—1200
InSb	In	$2\cdot10^{-9}$	27	600—800
	Sb	$1{,}4\cdot10^{-4}$	363	600—800
	Cu	$3{,}5\cdot10^{-5}$	35,7	500—760
	Ag	10^{-7}	24,2	700—800
	Au	$7\cdot10^{-4}$	30,9	400—800
	Li	$7\cdot10^{-4}$	27	770
	Hg	$4\cdot10^{-6}$	113	700—770
	Cd	10^{-5}	106	520—770
	Zn	$1{,}6\cdot10^{6}$	222	620—770
	Sn	$1{,}3\cdot10^{-6}$	62,7	570—770
	Ge	$5\cdot10^{-6}$	91,5	600—770
	S	$4\cdot10^{5}$	101	470—720
	Se	0,016	125	470—720
	Co	$2{,}7\cdot10^{11}$	37,7	770—770
	Fe	10^{-7}	24,2	700—780
	Te	$6{,}6\cdot10^{-5}$	115	630—770
GaP	S	3200	453	1400—1700
GaAs	Ga	10^{7}	540	1400—1500
	As	$4\cdot10^{4}$	980	1400—1500
	Li	0,53	96,5	520—770
	Au	10^{-3}	106	860—1330
	Mg	$4\cdot10^{-5}$	118	1070—1270
	Cd	0,0013	212	1070—1370
	Zn	$3\cdot10^{-7}$	96,5	1070—1370
	Ge	7,5	348	1320—1410
	Sn	$6\cdot10^{4}$	241	1300—1500
	S	180	251	1100—1500
	Mn	0,65	240	1000—1300
	Te	$2{,}6\cdot10^{-5}$	193	1270—1370
CdS	Cd	3	193	1000—1420
	Cd	$1{,}1\cdot10^{-5}$	60	670—1000
	Cu	2000	92,7	420—670
	Cu	0,0015	73,4	670—1020
	Ag	0,24	77,2	570—770
	Au	200	174	770—1070
	Li	$3\cdot10^{-6}$	65,6	880—1230

Продолжение табл. 17.40

Полупроводник	Диффундирующее вещество	D_0, см²/с	Q, кДж/моль	Диапазон температур, К
CdSe	Se	$1{,}3\cdot10^{5}$	42,8	1220—1700
	P	—	203	1070—1270
CdTe	Se	$1{,}7\cdot10^{-4}$	130	950—1200
	In	0,041	154	720—1300
	Au	67	193	600—1000
	Cu	$3{,}7\cdot10^{-4}$	64,7	370—570
ZnS	Zn	$3\cdot10^{-4}$	147	1170—1200
	Zn	$1{,}5\cdot10^{-4}$	314	1210—1300
	S	—	328	970—1160
ZnSe	Zn	1000	332	1000—1100
	Cu	$1{,}7\cdot10^{-5}$	64	470—840
ZnTe	Zn	0,01	183	1060—1220
	Te	$2\cdot10^{-4}$	367	1000—1270
HgTe	Cd	$3{,}1\cdot10^{-4}$	66,7	520—620

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник** химика. М.: Химия. 1964. Т. 3.
2. **Marrero T. A., Mason E. A.**//J. Phys. Chem. R Data. 1972. Vol. 1. P. 3—76.
3. **Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М.** Явления переноса в слабоионизованной плазме. М.: Атомиздат. 1975.
4. **Крюков Н. А.** Взаимодействие атомов ртути с атомами инертных газов. Автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук. Л.: ЛГУ. 1984.
5. **Рид Р., Шервуд Т.** Свойства газов и жидкостей: Пер. с англ. Л.: Химия. 1971.
6. **Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т.** Свойства газов и жидкостей: Пер. с англ. Л.: Химия. 1982.
7. **Бретшнейдер С.** Свойства газов и жидкостей: Пер. с польск. М.: Химия. 1986.
8. **Adda Y., Philibert J.** La diffusion dans les solids. Paris: Press Universitaires de France, 1966. Vol. 2.
9. **Алефельд Г. Фёлькль И.**//Водород в металлах/Под ред. Г. Алефельда и И. Фёлькля: Пер. с англ. М.: Мир. 1981.
10. **Warburton W. K., Turnbull D.**//Diffusion in Solids. Amsterdam: North Holland. 1975.
11. **Болтакс Б. И.** Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Л.: Наука. 1972.

ГЛАВА 18

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ И ПЛАЗМЕ

А. В. Елецкий

18.1. КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ МОЛЕКУЛ В ГАЗАХ

Процесс, в результате которого энергия молекулярных колебаний превращается в энергию поступательного движения частиц, описывается формулой

$$AB(v) + M \rightarrow AB(v') + M + \Delta E, \quad (18.1)$$

где AB — молекула; v, v' — колебательные квантовые числа; M — частица газа (атом, молекула), ΔE — энергия, выделяющаяся в виде поступательного движения сталкивающихся частиц. При колебательной релаксации наиболее эффективно протекают процессы, сопровождающиеся изменением колебательного квантового числа на единицу ($v - v' = 1$)[1]. Именно такие процессы наиболее подробно изучены экспериментально. В табл. 18.1 представлены значения константы k скорости колебательной релаксации двухатомных молекул, которые измерены при различных температурах для молекул, находящихся в первом колебательно-возбужденном состоянии ($v = 1$, $v' = 0$). Погрешность приведенных данных составляет несколько сотен процентов. В табл. 18.2, 18.3 приведены значения константы скорости колебательной релаксации молекул при различных температурах и значениях колебательного квантового числа v. Параметры процессов колебательной релаксации и обмена колебательными квантами молекулы CO приведены на рис. 18.1 и 18.2.

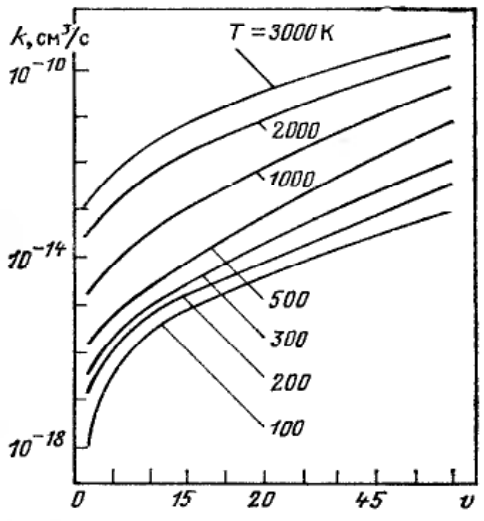


Рис. 18.1. Зависимость константы скорости колебательной релаксации молекулы CO при столкновении с атомом He от колебательного квантового числа молекулы CO $(v) + He \rightarrow CO(v-1) + He + \Delta E$[3]

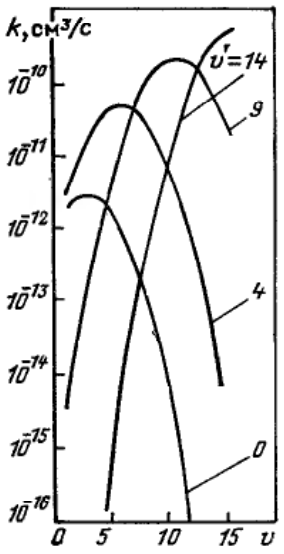


Рис. 18.2. Зависимость константы скорости обмена колебательными квантами при столкновении между молекулами CO $[CO(v) + CO(v') \rightarrow CO(v-1) + CO(v'+1)]$ от колебательного квантового числа v молекулы ($T = 300$ K) [3]

Таблица 18.1. **Константа скорости колебательной релаксации двухатомных молекул, находящихся в первом колебательно-возбужденном состоянии, k, 10^{-16} см³/с [1, 2]**

Молекула AB	Примесь M	Температура, K		
		300	800	2000
H_2	H_2	0,8	—	—
D_2	D_2*1	0,3 [5]	—	—
HD	HD	1,3	—	—
N_2	N_2	—	0,56	14
CO	CO	0,18	—	97
NO	NO	640	—	$4{,}7 \cdot 10^5$
O_2	O_2	0,06	11	260

Продолжение табл. 18.1

Молекула AB	Примесь M	Температура, K		
		300	800	2000
F_2	F_2	18	—	—
Cl_2	Cl_2	89	3500	—
Br_2	Br_2	1150	—	—
HF	HF	$1{,}7\cdot10^4$	10^4	$8{,}2\cdot10^3$
HCl	HCl	180	1000	10^4
HBr	HBr	170	800	10^4
HI	HI	—	1000	10^4
DF	DF	$1{,}1\cdot10^4$	5100	8600
DCl	DCl	63	—	—
CS	CS	3400	—	—
D_2	H_2	2,7	—	—
	HD	1,4	—	—
	DF	8300	—	—
HF	He	—	—	1300
	Ar	—	—	250
	F	10^6	—	$4{,}2\cdot10^5$
	H_2	6800	—	500
	D_2	1050	2600	—
	N_2	36	1200	—
	DF	$1{,}8\cdot10^4$	$1{,}2\cdot10^4$	10^4
	H	$3{,}6\cdot10^4$	—	—
HCl	H_2	55	900	8000
	Ar	0,03	—	—
	D_2	4,4	—	—
	HD	23	—	—
	Br	2600	—	—
	Cl	$7\cdot10^4$	—	—
	He	$5{,}5\cdot10^4$	—	—
	Ne	$4{,}4\cdot10^4$	—	—
	Kr	$4{,}2\cdot10^4$	—	—
	H	$7{,}7\cdot10^4$	—	—
	D	$1{,}1\cdot10^5$	—	—
	Cl_2	55	—	—
HBr	He	$4{,}5\cdot10^4$	—	—
	HD	80	—	—
	Ne	$4{,}8\cdot10^4$	—	—
	DF	2800	—	—
	Kr	$4{,}7\cdot10^4$	—	—
	Br	$2{,}6\cdot10^4$	—	—
	H_2	100	—	—
	D_2	110	—	—
DF	Ar	—	—	120
	N_2	230	—	1200
	H_2	180	1200	8200
	HF	10^4	—	$1{,}7\cdot10^5$
	D_2	6400	—	—
DCl	He	0,62	—	—
	Cl	$5{,}5\cdot10^4$	—	—
	H_2	190	—	—
	HD	780	—	—
	Br	2300	—	—
	D_2	17	—	—
	H	$1{,}8\cdot10^4$	—	—
	D	$2\cdot10^4$	—	—

Продолжение табл. 18.1

Молекула AB	Примесь M	Температура, K		
		300	800	2000
H_2	HF	8300	—	—
	He*2	0,2	3	2000
	Ar	0,1	—	—
	D_2	0,24	—	—
CO	He	0,27 [5]	2,1 [5]	300 [5]
	H	—	—	$2{,}7\cdot10^6$
	Ne	0,009	—	5,3
	H_2*3	4,0 [4]	—	—
	HD	1,9 [5]	—	—
	D_2	0, 12 [5]	—	—
	O_2	0,4	—	—
	O	3600	5800	$5\cdot10^4$
NO	Ar	85		
	CO	340	—	—
	N_2	10,3	—	—
	He	2600	—	—
Cl_2	He	10^4	—	—
	H_2	$1{,}9\cdot10^4$	—	—
	N_2	70	—	—
N_2	O	45	360	2500
	He	14	—	—
	H_2	150	—	—
	D_2	12	—	—
D_2	He	0,07	—	—
	H_2	2,8	—	—
O_2^+	He	<20 [6]	—	—
	Ne	<130 [6]	—	—
	Ar	10^4 [6]	—	—
	Kr	$1{,}1\cdot10^5$ [6]	—	—
	H_2	$2{,}5\cdot10^4$ [6]	—	—
	D_2	6500 [6]	—	—
	N_2	$1{,}9\cdot10^4$ [6]	—	—
	CO	$4{,}4\cdot10^5$ [6]	—	—
	O_2	$3\cdot10^6$ [6]	—	—

*1 $k = 0{,}011\cdot10^{-16}$ см³/с при 77 K [5].
*2 $k = 0{,}017\cdot10^{-16}$ см³/с при 77 K [1,2].
*3 $k = 0{,}18\cdot10^{-16}$ см³/с при 77 K [4].

Таблица 18.2. **Константа скорости колебательной релаксации молекул HF (DF) при столкновении с невозбужденными молекулами HF (DF) k, 10^{-12} см³/с** [9, 10]

v	T, K				
	300	500	1000	1800	2400
$HF(v) + HF(0) \rightarrow HF(v-1) + HF(0)$					
1	1,5	1,2	0,88	0,57	0,88
2	7,4	6,2	4,6	2,9	4,6
3	16	13	8,8	5,6	8,8
4	23	21	15	9,4	14
5	34	28	20	12	19
6	41	32	24	14	24

Продолжение табл. 18.2

v	T, K				
	300	500	1000	1800	2400
	DF (v) + DF (0) → DF (v — 1) + DF (0)				
1	1,0	0,56	0,42	0,74	1,34
2	4,4	2,3	1,9	3,2	5,4
3	9,3	4,8	4,1	6,7	11
4	13	7,7	6,2	10	17
5	18	10,3	7,5	13	21
6	21	12	8,8	15	27
	DF (v) + HF (0) → DF (v — 1) + HF (0)				
1	1,1	0,73	0,72	0,52	0,63
2	4,5	3,1	2,5	2,2	3,0
3	11	7,3	4,9	4,4	6,1
4	16	11	7,3	8	9,3
5	22	16	11	10	12
6	25	18	14	12	13
	HF (v) + DF (0) → HF (v — 1) + DF (0)				
1	1,8	1,4	0,95	0,97	1,0
2	8,3	6,9	4,6	4,4	4,5
3	18	14	9,4	9,6	10
4	30	24	15	14	16
5	41	31	21	20	21
6	53	37	25	22	22

Таблица 18.3. **Константа скорости колебательной релаксации двухатомных молекул, находящихся в различных колебательно-возбужденных состояниях k, 10^{-12} см³/с (T = 300 K) [1, 2]**

Молекула AB	Примесь M	v						
		1	2	3	4	5	6	7
HCl	H [7]	50	85	110	—	—	130	—
	Cl [7]	8,3	14,2	18,3	—	—	70	—
	Br [8]	0,28	1,4	—	—	—	—	—
	H_2	0,0044	0,0088	0,014	0,019	—	—	—
HF	O_2	0,0011	0,0074	0,02	0,05	0,14	0,34	0,5
	N_2	0,0046	0,026	0,08	0,14	0,57	1,7	3,7
	D_2	0,09	0,57	1,4	3	5,7	8	12
	CO_2	1,1	5,7	10	20	30	43	43
	H_2	0,68	0,21	0,15	0,21	0,49	0,99	0,16
DF	H_2	0,18	0,06	0,14	0,29	—	—	—
	N_2	0,023	0,074	0,17	0,3	—	—	—

18.2. РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ НА АТОМАХ И МОЛЕКУЛАХ

Таблица 18.4. **Транспортное сечение рассеяния электронов на атомах и молекулах, 10^{-16} см² [27]**

Энергия электрона, эВ	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H_2	N_2	D_2	O_2	CO_2	CO	H_2O
0,01	5,2	—	5,7	25	120	7,3	2,2	7,3	3,0	170	7,8	4000
0,02	5,4	—	4,0	20	80	8,0	2,9	8,0	3,0	120	5,9	1700
0,04	5,5	0,50	2,4	14	50	9,0	3,9	9,0	3,0	85	5,2	790
0,06	5,7	0,57	1,5	10	37	9,6	4,6	9,6	3,0	—	6,0	500
0,08	5,8	0,64	0,8	8	28	10,1	5,2	10,1	3,4	—	—	350
0,1	5,9	0,70	0,4	6,9	21	10,5	6,0	10,6	4,4	52	7,3	—
0,20	6,2	0,93	0,17	3,0	8,2	12,0	8,3	12	4,9	34	10,0	—
0,30	6,4	1,09	0,16	1,0	4,0	13,0	9,6	14	4,6	18	12	—
0,40	6,5	1,22	0,18	0,6	1,9	13,9	10	14,5	4,7	—	13,5	—
0,50	6,6	1,32	0,22	0,56	1,4	14,7	10	15	5,1	7,3	14	—
0,60	6,7	1,40	0,4	0,52	1,3	15,6	10	16	5,5	5,7	15	—
0,70	6,7	1,47	0,54	0,54	1,4	16,3	10	17	6,1	5,0	15,5	—
0,80	6,8	1,53	0,77	0,56	1,5	17	10	17,5	6,8	—	16	—
1,0	6,8	1,62	1,0	0,60	2,1	18	10,5	18	7,6	4,1	17,0	—
2,0	7,0	1,82	2,6	2,0	8,0	18,0	20	—	7,1	4,8	—	—
2,5	7,0	1,86	—	—	—	17	32	—	6,3	6,4	—	—
3,0	6,9	1,91	4,0	4,0	15	16	30	—	5,6	10,4	—	—
4,0	6,6	1,98	5,9	7,0	23	14	13	—	5,2	17,1	—	—
5,0	6,3	2,07	7,9	10,0	32	13	11	—	5,4	14	—	—
6,0	6,0	2,14	9,0	13	34	—	10	—	5,8	—	—	—
7,0	—	2,21	10,6	16	35	—	9,7	—	—	—	—	—
8,0	—	—	11	18	35	—	9,6	—	7,2	11,7	—	—
9,0	—	—	12	19	33	—	9,5	—	—	—	—	—
10	—	—	14	21	32	—	9,8	—	8,4	12,9	—	—
15	—	—	12	22	30	—	11	—	9,4	—	—	—
20	—	—	10	19	22	—	13	—	9,1	—	—	—

Таблица 18.5. **Сечения пеннинговского процесса $A^+ + B \rightarrow A + B^+ + e$ при тепловой энергии, 10^{-16} см^2 (данные являются результатом усреднения по многочисленным измерениям, погрешность данных 50 — 100%) [11, 13]**

B	He				Ne				Ar				Kr			
	2^3S	2^1S	2^1P	3^1P	$^3P_2$	$^1P_1$	$^3P_0$	$^3P_1$	$^3P_2$	$^1P_1$	$^3P_0$	$^3P_1$	$^3P_2$	$^1P_1$	$^3P_0$	$^3P_1$
H	22	33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ar	7	25	86	56	3,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Kr	8,8	34	89	50	1	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—
Xe	12	40	84	73	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Hg	270	—	—	—	—	—	—	—	30	—	—	—	—	—	—	—
He(2^3S)	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Na	14	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Zn	36	—	—	—	42	—	—	—	53	—	—	—	93	—	—	—
Cd	72	—	—	—	46	—	—	—	65	—	—	—	110	—	—	—
H_2	2,3	2,7	26	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N_2	5,3	11	69	—	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
O_2	14	25	69	—	1,7	4	2,8	2,8	1,2	1,8	1,8	1,6	1,9	1,6	1,8	2,2
CO	8	16	—	—	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NO	17	36	—	—	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CO_2	51	70	—	—	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SF_6	28	53	—	—	38	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ne	—	—	—	40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cs	6,5	22	—	—	—	—	400	400	—	—	—	—	—	—	—	—
N_2O	36	38	—	—	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K	70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Li	32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Rb	35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 18.6. **Среднее сечение (усреднено по состояниям тонкой структуры) и константа скорости ассоциативной ионизации при столкновении с участием возбужденных атомов $A^* + B \rightarrow AB^+ + e$ [11, 13]**

A*	B	T, K	Константа скорости, 10^{-13} см^3/с	Среднее сечение, 10^{-16} см^2
Li ($2\,^2P$)	Li ($2\,^2P$)	900	—	0,005
Na ($3\,^2P$)	Na ($3\,^2P$)	500	380	3,8
K ($4\,^2P$)	K ($4\,^2P$)	500	9	0,13
Rb ($5\,^2P$)	Rb ($5\,^2P$)	470	3,2	0,7
Cs ($6\,^2P$)	Cs ($6\,^2P$)	425	2	0,54
He ($3\,^3S$)	He	320	—	0,07
He ($3\,^3P$)	He	320	—	1,7
He ($3\,^3D$)	He	320	—	3,2
He ($3\,^1P$)	He	320	—	2,1
He ($3\,^1D$)	He	320	—	17
Rb ($6\,^2P$)	Rb	475	16 000	—
Rb ($8\,^2P$)	Rb	520	3000	—
Rb ($9\,^2P$)	Rb	520	6600	—
Rb ($10\,^2P$)	Rb	520	9400	—

Продолжение табл. 18.6

A*	B	T, K	Константа скорости, 10^{-13} см^3/с	Среднее сечение, 10^{-16} см^2
Cs ($7\,^2P$)	Cs	425	1100	—
Cs ($8\,^2P$)	Cs	470	13	—
Cs ($9\,^2P$)	Cs	500	4600	—
Cs ($10\,^2P$)	Cs	500	6800	—
K ($6\,^2P$)	K	570	3000	—
K ($7\,^2P$)	K	570	45 000	—
K ($8\,^2P$)	K	570	74 000	—
K ($9\,^2P$)	K	570	75 000	—
U	O	2000	—	16,2
U	O_2	2000	—	0,17
U	O_3	2000	—	4
Th	O	2000	—	10,3
Th	O_2	2000	—	0,15
Th	O_3	2000	—	2000
Hg ($6\,^3P_0$)	Hg	400	—	460

18.3. ПРОЦЕССЫ ИОНИЗАЦИИ С УЧАСТИЕМ ВОЗБУЖДЕННЫХ АТОМОВ

При столкновении возбужденного атома с другим атомом или молекулой (как возбужденной, так и невозбужденной) возможны процессы двух типов, приводящие к ионизации [13, 14]. В процессе первого типа, носящем название пеннинговской ионизации, ионизация может происходить при условии, когда энергия возбуждения атома A* превышает потенциал ионизации другого атома или молекулы B:

$$A^* + B \rightarrow A + B^+ + e. \qquad (18.2)$$

В процессе второго типа, который называется ассоциативной ионизацией, часть энергии, необходимая для отрыва электрона, выделяется в результате образования молекулярного иона:

$$A^* + B \rightarrow AB^* + e. \qquad (18.3)$$

В случае, если энергия связи молекулярного иона AB^+ превышает потенциал ионизации молекулы AB, процесс ассоциативной ионизации может протекать и при участии невозбужденных частиц. Подобная ситуация имеет место в случае ассоциативной ионизации при столкновении атомов V и Th с атомами и молекулами кислорода. Приводимые в табл. 18.5 и 18.6 значения сечений и констант скорости пеннинговской и ассоциативной ионизации характеризуются погрешностью несколько десятков процентов.

18.4. ПРОЦЕССЫ РЕЗОНАНСНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ

К этим процессам относятся

$$AB^+ + AB \rightarrow AB + AB^+; \qquad (18.4)$$

$$AB^- + AB \rightarrow AB + AB^-. \qquad (18.5)$$

$$A^+ + A \rightarrow A + A^+; \qquad (18.6)$$

$$A^- + A \rightarrow A + A^-. \qquad (18.7)$$

Основным источником информации о параметрах этих процессов является расчет на основании асимптотической теории [17], погрешность которой 10—30% существенно ниже погрешности современного эксперимента. В табл. 18.7—18.9 приведены сечения процессов (18.4)—18.7) при различной энергии столкновения [20].

Таблица 18.7. **Сечение резонансной перезарядки положительных и отрицательных молекулярных ионов на молекулах того же сорта, 10^{-16} см^2 [20]**

Ион	Энергия столкновения, эВ					
	0,1	1,0	10	100	1000	10 000
H_2^+	—	25	17	7	7	6
N_2^+	66	52	38	32	23	—
O_2^+	50	36	25	18	14	—
CO^+	82	67	52	39	29	—
NO^+	49	37	25	17	5,5	—
O_2^-	13	7	5,5	4,7	2,2	—

Таблица 18.8. **Сечение резонансной перезарядки иона на собственном атоме, 10^{-16} см^2 [20]**

Атом	Энергия столкновения, эВ					
	0,1	1	10	100	1000	10 000
H	67,1	49,2	36,7	26,2	17,2	9,5
He	37,1	27,4	20,8	15,3	10,6	6,6
Li	313	228	180	140	103	70,8
Be	150	108	83,6	63,9	46,6	31,4
B	120	83,2	62,0	45,0	30,5	18,4
C	95,6	58,7	40,7	28,2	18,3	10,5
N	60,5	39,5	28,5	20,4	13,7	8,1
O	60,2	41,3	30,3	21,6	14,4	8,4
F	54,7	33,5	23,2	16,0	10,5	6,1
Ne	38,3	25,7	18,9	13,7	9,4	5,9
Na	350	264	212	168	128	92,0
Mg	211	155	123	96,0	72,4	51,2
Al	204	147	113	84,7	60,2	38,9
Si	169	106	76,1	55,0	37,9	23,7
P	110	75,3	57,1	43,0	31,0	20,8
S	99,3	66,0	48,7	55,6	24,5	15,3
Cl	100	54,1	42,9	31,0	21,5	13,8
Ar	71,9	44,2	36,6	27,7	20,2	13,8
K	457	347	282	225	174	127
Ca	301	218	174	138	105	76
Sc	281	206	165	131	101	74
Ti	273	196	157	124	96	70
V	279	208	168	135	105	78
Cr	239	181	144	114	86	61
Mn	241	177	142	114	88	64
Fe	223	163	130	104	80	59
Co	227	171	139	112	87	65
Ni	235	182	148	120	94	70
Cu	207	161	130	104	79	58
Zn	174	128	102	81	62	45
Ga	189	154	123	94	67	46
Ge	145	118	94	72	52	36
As	105	86	69	53	39	27
Se	105	86	68	53	39	27
Br	128	78	56	41	30	20
Kr	90	62	48	37	28	18
Rb	500	386	316	256	201	150
Sr	326	253	206	166	129	96
V	255	214	177	142	111	82
Zr	235	198	164	132	103	76
Nb	218	182	149	119	91	66
Mo	210	176	144	114	88	64
Tc	221	186	154	124	97	72
Ru	198	166	135	107	82	59
Rh	195	163	133	105	80	58
Pd	50	37	25	17,1	10,2	5,8
Ag	224	170	137	109	84	61
Cd	191	141	113	90	70	51
In	208	171	137	107	79	55
Sn	158	129	102	78	57	39
Sb	137	114	92	72	55	40
Te	128	106	85	67	51	36
I	146	97	73	56	41	29
Xe	116	82	64	51	39	28
Cs	548	427	359	292	231	174
Ba	400	296	240	194	152	114
La	328	278	233	191	152	116
Ce	218	182	149	118	91	66
Pr	352	299	249	202	160	120
Nd	244	204	167	133	102	74
Pm	244	204	168	133	102	74
Sm	362	307	256	209	165	125
Eu	297	250	207	167	130	97

Продолжение табл. 18.8

Атом	Энергия столкновения, эВ					
	0,1	1	10	100	1000	10 000
Gd	264	222	184	148	115	85
Tb	218	182	149	118	90	64
Dy	214	179	146	115	87	62
Ho	210	174	142	112	85	61
Er	210	174	141	112	85	60
Tu	208	174	141	111	84	60
Yb	250	210	172	137	105	76
Hf	247	210	175	143	113	86
Ta	208	176	146	118	93	70
W	241	174	140	115	89	66
Re	226	192	160	130	103	78
Os	179	151	125	101	79	59
Ir	172	145	120	97	78	57
Pt	158	132	108	86	66	48
Au	158	132	109	87	67	49
Hg	158	120	97	78	60	45
Tl	204	169	137	107	80	57
Pb	218	148	112	86	64	44
Bi	186	155	128	102	79	59
Po	117	95	75	57	41	28
Ac	348	297	249	205	164	127
Th	282	239	199	162	128	97
Pa	314	266	222	181	143	108
U	295	221	209	171	136	104
Np	455	391	330	273	221	172
Pu	376	320	269	220	176	135
Am	488	422	357	297	241	190
Cm	456	392	333	277	225	177
Bk	477	410	347	288	234	183
No	438	375	316	261	210	162

Таблица 18.9. Сечение резонансной перезарядки отрицательного иона на собственном атоме, 10^{-16} см^2 [20]

Атом	Энергия столкновения, эВ					
	0,1	1,0	10	100	1000	10 000
H	415	266	172	104	23	—
Li	640	480	375	233	145	79
B	323	239	140	72	30	9,2
C	166	118	80	50	29	14,1
O	123	85	55	33	17,6	8,1
F	85	59	41	27	16,6	9,2
Na	822	628	461	322	209	123
Al	380	292	202	126	62	36
Si	222	166	120	82	53	31
P	293	212	145	93	54	28
S	148	110	78	53	34	19,4
Cl	122	84	61	43	29	18,5
K	939	723	537	380	252	152
Fe	—	807	588	406	261	150
Co	605	475	361	263	182	117
Ni	463	368	284	211	150	100
Cu	472	373	286	212	149	98
Se	181	138	101	71	47	29
Br	153	104	77	56	39	26
Rb	—	906	691	507	253	229
Ag	487	388	302	227	163	110
Sn	313	242	181	130	89	57
Sb	326	254	187	132	88	54
Te	220	170	127	91	62	40
I	162	129	99	74	53	36
Cs	—	—	—	—	773	505
Au	320	265	216	171	132	99

18.5. ИОННО-МОЛЕКУЛЯРНЫЕ РЕАКЦИИ

Таблица 18.10. Константа скорости процессов, происходящих при участии молекулярных ионов, k, 10^{-30} см^6/с (T = 300 K) [21]

Процесс	k	Процесс	k
$He^+ + 2He \rightarrow He_2^+ + He$	1,0	$Hg^+ + 2Hg \rightarrow Hg_2^+ + Hg$	1 (700 K)
$Ne^+ + 2Ne \rightarrow Ne_2^+ + Ne$	0,60	$He_2^+ + 2He \rightarrow He_3^+ + He$	1,7 (77 K)
$Ar^+ + 2Ar \rightarrow Ar_2^+ + Ar$	2,2	$Ar_2^+ + 2Ar \rightarrow Ar_3^+ + Ar$	32 (77 K)
$Kr^+ + 2Kr \rightarrow Kr_2^+ + Kr$	2,3	$Ar_2^+ + Ar + He \rightarrow Ar_3^+ + He$	5,5 (80 K)
$Xe^+ + 2Xe \rightarrow Xe_2^+ + Xe$	2,8	$Cs_2^+ + 2Cs \rightarrow Cs_3^+ + Cs$	300
$Cs^+ + 2Cs \rightarrow Cs_2^+ + Cs$	150	$Ne^+ + Ne + He \rightarrow Ne_2^+ + He$	3,0

Процесс	k	Процесс	k
$Ar^+ + Ar + He \rightarrow Ar_2^+ + He$	1,0 (82 K)	$Ca^+ + O_2 + Ar \rightarrow CaO_2^+ + Ar$	6,6
$Kr^+ + Kr + He \rightarrow Kr_2^+ + He$	0,6	$Fe^+ + O_2 + Ar \rightarrow FeO_2^+ + Ar$	1,0
$Xe^+ + Xe + He \rightarrow Xe_2^+ + He$	1,3	$Na^+ + O_2 + Ar \rightarrow NaO_2^+ + Ar$	0,2
$Hg^+ + Hg + He \rightarrow Hg_2^+ + He$	1,7 (700 K)	$K^+ + O_2 + Ar \rightarrow KO_2^+ + Ar$	$<0,2$
$Ne^+ + 2He \rightarrow NeHe^+ + He$	0,21	$Li^+ + 2N_2 \rightarrow LiN_2^+ + N_2$	2,0
$Ar^+ + Ar + Ne \rightarrow Ar_2^+ + Ne$	3	$Li^+ + 2O_2 \rightarrow LiO_2^+ \rightarrow O_2$	1,1
$HeH^+ + 2He \rightarrow He_2H^+ + He$	0,4 (200 K)	$Na^+ + 2O_2 \rightarrow NaO_2^+ + O_2$	0,1 (193 K)
$H_3^+ + 2Ar \rightarrow H_3^+ Ar + Ar$	1	$LiN_2^+ + 2N_2 \rightarrow Li\ (N_2)_2^+ + N_2$	2,2
$Li^+ + 2Ar \rightarrow Li^+Ar + Ar$	1,8	$O_2N_2^+ + N_2 + He \rightarrow N_4O_2^+ + He$	10 (80 K)
$H^+ + 2H_2 \rightarrow H_3^+ + H_2$	30	$O_4^+ + O_2 + He \rightarrow O_6^+ + He$	5 (80 K)
$D^+ + 2D_2 \rightarrow D_3^+ + D_2$	30	$O_4^+ + N_2 + He \rightarrow O_4N_2^+ + He$	10 (80 K)
$H_3^+ + 2H_2 \rightarrow H_5^+ + H_2$	0,65	$O_4^+ + 2O_2 \rightarrow O_6^+ + O_2$	0,07
$D_3^+ + 2D_2 \rightarrow D_5^+ + D_2$	0,45	$O_6^+ + 2O_2 \rightarrow O_8^+ + O_2$	25 (90 K)
$N^+ + 2N_2 \rightarrow N_3^+ + N_2$	30	$NO^+ + 2N_2 \rightarrow NO^+N_2 + N_2$	0,2
$N^+ + N_2 + He \rightarrow N_3^+ + He$	30 (80 K)	$NO^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^+ + O_2$	0,09
$N_2^+ + 2N_2 \rightarrow N_4^+ + N_2$	85	$NO^+ + 2CO_2 \rightarrow NOCO_2^+ + CO_2$	24
$O_2^+ + 2O_2 \rightarrow O_4^+ + O_2$	2,5	$NO^+ + CO_2 + He \rightarrow NOCO_2^+ + He$	4
$O_2^+ + O_2 + He \rightarrow O_4^+ + He$	1,5	$NO^+ + CO_2 + Ar \rightarrow NOCO_2^+ + Ar$	25 (200 K)
$O_2^+ + O_2 + Kr \rightarrow O_4^+ + Kr$	8 (180 K)	$NO^+ + CO_2 + N_2 \rightarrow NOCO_2^+ + N_2$	30 (200 K)
$O_2^+ + O_2 + H_2O \rightarrow O_4^+ + H_2O$	1,5	$NO^+ + 2NH_3 \rightarrow NONH_3^+ + NH_3$	54
$O_2^+ + 2N_2 \rightarrow O_2^+ N_2 + N_2$	0,8	$NH_4^+ + NH_3 + O_2 \rightarrow N_2H_7^+ + O_2$	1800
$O_2^+ + N_2 + He \rightarrow O_2^+N_2 + He$	19 (80 K)	$Na^+ + 2CO_2 \rightarrow NaCO_2^+ + CO_2$	50
$O_2^+ + H_2 + He \rightarrow O_2^+ H_2 + He$	0,74 (80 K)	$Na^+CO_2 + 2CO_2 \rightarrow Na^+ (CO_2)_2 + CO_2$	0,05
$O_2^+ + O_3 + He \rightarrow O_5^+ + He$	100 (200 K)	$Cs^+ + SO_2 + N_2 \rightarrow CsSO_2^+ + N_2$	30
$O^+ + N_2 + He \rightarrow N_2O^+ + He$	54 (80 K)	$Na^+ + He + H_2O \rightarrow NaH_2O^+ + He$	4,7
$NO^+ + 2NO \rightarrow N_2O_2^+ + NO$	5	$Na^+ + 2H_2O \rightarrow NaH_2O^+ + H_2O$	100
$CO^+ + 2CO \rightarrow C_2O_2^+ + CO$	140	$K^+ + He + H_2O \rightarrow KH_2O^+ + He$	2,6
$CO_2^+ + 2CO_2 \rightarrow C_2O_4^+ + CO_2$	320	$K^+ + 2H_2O \rightarrow KH_2O^+ + H_2O$	45
$C_2H_2^+ + 2C_2H_4 \rightarrow C_4H_8^+ + C_2H_4$	2000	$Cs^+ + H_2O + N_2 \rightarrow CsH_2O^+ + N_2$	9
$O_2^+ + CO_2 + He \rightarrow CO_4^+ + He$	23 (200 K)	$Xe^+ + H_2O + He \rightarrow XeH_2O^+ + He$	15
$O_2^+ + N_2O + He \rightarrow N_2O_3^+ + He$	52 (200 K)	$NO^+ + H_2O + He \rightarrow NOH_2O^+ + He$	34
$O_2^+ + SO_2 + He \rightarrow SO_4^+ + He$	600 (200 K)	$NO^+ + H_2O + N_2 \rightarrow NOH_2O^+ + N_2$	150
$Mg^+ + O_2 + Ar \rightarrow MgO_2^+ + Ar$	2,5	$NO^+ + H_2O + O_2 \rightarrow NOH_2O^+ + O_2$	86

Продолжение табл. 18.10

Процесс	k	Процесс	k
$NO^+ + H_2O + NO \rightarrow NOH_2O^+ + NO$	150	$H_3O^+ + H_2O + Ar \rightarrow H_5O_2^+ + Ar$	40
$NO^+ + 2H_2O \rightarrow NOH_2O^+ + H_2O$	150	$H_3O^+ + H_2O + N_2 \rightarrow H_5O_2^+ + N_2$	340
$NOH_2O^+ + H_2O + He \rightarrow NO(H_2O)_2^+ + He$	300	$H_3O^+ + H_2O + O_2 \rightarrow H_5O_2^+ + O_2$	270
$NOH_2O^+ + H_2O + Ar \rightarrow NO(H_2O)_2^+ + Ar$	900	$NO_2^+ + H_2O + N_2 \rightarrow NO_2H_2O^+ + N_2$	500
$NOH_2O^+ + H_2O + N_2 \rightarrow NO(H_2O)_2^+ + N_2$	1100	$O_2^+ + H_2O + He \rightarrow H_2O_3^+ + He$	87
$NOH_2O^+ + H_2O + O_2 \rightarrow NO(H_2O)_2^+ + O_2$	800	$O_2^+ + H_2O + N_2 \rightarrow H_2O_3^+ + N_2$	270
$NOH_2O^+ + H_2O + NO \rightarrow NO(H_2O)_2^+ + NO$	1100	$O_2^+ + H_2O + O_2 \rightarrow H_2O_3^+ + O_2$	200
$H_3O^+ + H_2O + He \rightarrow H_5O_2^+ + He$	120	$O_2^+ + H_2O + Ar \rightarrow H_2O_3^+ + Ar$	170

Таблица 18.11. **Константы скорости процессов, происходящих при участии молекулярных отрицательных ионов, k, 10^{-30} см^6 ($T = 300$ К) [21]**

Процесс	k
$O^- + 2O_2 \rightarrow O_3^- + O_2$	0,9
$O_2^- + 2O_2 \rightarrow O_4^- + O_2$	0,4
$O_2^- + O_2 + He \rightarrow O_4^- + He$	0,34 (200 К)
$O^- + CO_2 + He \rightarrow CO_3^- + He$	150
$O^- + 2CO_2 \rightarrow CO_3^- + CO_2$	90
$O_2^- + CO_2 + He \rightarrow CO_4^- + He$	47 (200 К)
$O_2^- + 2CO_2 \rightarrow CO_4^- + CO_2$	9
$O_2^- + CO_2 + O_2 \rightarrow CO_4^- + O_2$	20
$O^- + N_2 + He \rightarrow N_2O^- + He$	0,04 (200 К)
$O_2^- + N_2 + He \rightarrow N_2O_2^- + He$	0,04 (200 К)

Продолжение табл. 18.11

Процесс	k
$O^- + H_2O + O_2 \rightarrow H_2O_2^- + O_2$	100
$O_2^- + H_2O + O_2 \rightarrow H_2O_3^- + O_2$	160
$O_3^- + H_2O + O_2 \rightarrow H_2O_4^- + O_2$	210
$H_2O_3^- + H_2O + O_2 \rightarrow H_4O_4^- + O_2$	540
$NO^- + CO_2 + Ar \rightarrow NO^-CO_2 + Ar$	56
$NO^- + N_2O + Ar \rightarrow N_3O_2^- + Ar$	7,8
$NO_2^- + H_2O + NO \rightarrow NO_2H_2O^- + NO$	150
$Br^- + 2Br_2 \rightarrow Br_3^- + Br_2$	29
$Cl^- + H_2O + NO \rightarrow ClH_2O^- + NO$	120
$WO_3^- + O_2 + Ar \rightarrow WO_5^- + Ar$	10^3

18.6. ПРОЦЕССЫ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ

Нейтрализация заряженных частиц в объеме плазмы происходит в результате различных рекомбинационных процессов. Эти процессы характеризуются коэффициентом рекомбинации, который определяется соотношением

$$dN_-/dt = -\alpha_{рек} N_- N_+, \qquad (18.8)$$

где N_-, N_+ — концентрации отрицательно и положительно заряженных частиц; $\alpha_{рек}$ — коэффициент рекомбинации, который зависит от сорта рекомбинирующих частиц, состояния плазмы и конкретного механизма рекомбинации.

Тройная рекомбинация. Процесс, ответственный за нейтрализацию плазмы с достаточно высокой плотностью заряженных частиц, описывается формулой

$$A^+ + 2e \rightarrow A + e \qquad (18.9)$$

(A — атомарный или молекулярный ион). Выражение для коэффициента тройной рекомбинации, см^3/с, имеет вид [12]

$$\alpha_{тр} \approx \frac{4e^{10}}{m^{1/2} T_e^{9/2}}; \qquad N_e \approx \frac{0{,}6 \cdot 10^{-27} N_e}{T_e^{9/2}}, \quad (18.10)$$

где e — заряд электрона; N_e — плотность электронов, см$^{-3}$; T_e — температура электронов, эВ. Выражение (18.10) справедливо в пределе больших плотностей электронов, когда переходы между высоковозбужденными состояниями атомов (молекул) обусловлены неупругими соударениями с электронами, а излучательные процессы несущественны. Кроме того, предполагается, что температура электронов T_e много меньше потенциала ионизации атомной частицы, так что при столкновениях наиболее вероятны переходы между близко расположенными энергетическими состояниями. При нарушении указанных условий коэффициент тройной рекомбинации будет зависеть от сорта рекомбинирующей частицы. На рис. 18.3 представлены зависимости отношения $\alpha_{тр}/N_e$ от температуры плазмы для атомов K, Cs, N, Ar, He, H [12]

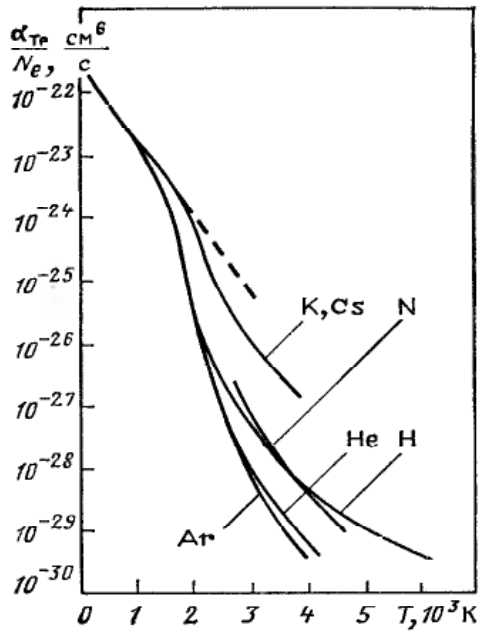


Рис. 18.3 Коэффициент радиационно-столкновительной рекомбинации при различной температуре для различных газов [12]

Диссоциативная рекомбинация. Этот процесс является основным каналом нейтрализации заряженных частиц в низкотемпературной плазме, где основным сортом положительных ионов являются молекулярные ионы [15]:

$$e + AB^+ \rightarrow A + B. \quad (18.11)$$

Обычно один из продуктов диссоциативной рекомбинации оказывается в электронно-возбужденном состоянии. Значения константы скорости диссоциативной рекомбинации, полученные в результате усреднения многочисленных экспериментальных данных, представлены в табл. 18.12, погрешность составляет 10—20%. Данные об энергетической зависимости сечений и температурной зависимости коэффициентов диссоциативной рекомбинации приведены в табл. 18.13, где указаны также диапазоны температуры и энергий, в которых погрешность приводимых аппроксимаций не превышает 30%.

Ион-ионная рекомбинация. В плазме электроотрицательных газов важный механизм нейтрализации заряженных частиц связан с ион-ионной рекомбинацией:

$$A^+ + B^- \rightarrow A + B \quad (18.12)$$

или

$$A^+ + B^- + R \rightarrow A + B + R. \quad (18.13)$$

Значения константы скорости парной ион-ионной рекомбинации (18.12) при комнатной температуре приведены в табл. 18.14. Эти данные получены путем усреднения по результатам многочисленных экспериментов [17]. Погрешность указанных данных достигает 50%. Коэффициент парной ион-ионной рекомбинации характеризуется следующей зависимостью от температуры газа:

$$\alpha = \alpha_0 (T_0/T)^{1/2}, \quad (18.14)$$

где α_0 — значения коэффициента при $T = T_0$.

При давлении, превышающем несколько сотен паскалей, основным механизмом ион-ионной рекомбинации становится не парная (18.12), а тройная (18.13) рекомбинация. Константа скорости этого процесса характеризуется немонотонной зависимостью от давления с максимумом при $p \approx 10^5$ Па [17].

В табл. 18.15 представлены зависимости констант скорости тройной ион-ионной рекомбинации отрицательного иона галогена и положительного иона инертного газа от плотности инертного газа, атомы которого играют роль третьей частицы [19].

18.7. ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

Отрицательные ионы могут образовываться в результате парных процессов диссоциативного прилипания электронов [17]:

$$AB + e \rightarrow A + B^-, \quad (18.15)$$

в результате захвата электрона в автоионизационное состояние отрицательного иона и последующего тушения этого состояния при столкновении с третьей частицей:

$$e + AB \rightarrow (AB^*)^-; \quad (AB^*)^- + M \rightarrow AB^- + M. \quad (18.16)$$

и в результате прилипания электрона к молекуле при тройном столкновении:

$$e + AB + M \rightarrow AB^- + M. \quad (18.17)$$

Константа скорости диссоциативного прилипания (18.15) является функцией средней энергии электронов в газе. Константа скорости процесса (18.16) измеряется в см^3/с, однако зависит от давления и состава газовой смеси. Константа скорости тройного прилипания, см^6/с, зависит от температуры и состава газа. В табл. 18.6—18.20 и на рис. 18.4 приведены сечения и константы скорости процессов (18.15)—(18.17).

Таблица 18.12. **Коэффициент диссоциативной рекомбинации при $T = 300$ К, 10^{-7} см³/с [15]**

Ион	H_2^+	Ne_2^+	Ar_2^+	Kr_2^+	Xe_2^+	$HeNe^+$	C_2^+	O_2^+	N_2^+	NO^+
α	0,3	1,8	6,9	10,3	20	0,2	10 (100К)	2,0	3,3	3,7

Ион	CH^+	CO^+	CO_2^+	CH_2^+	He_3^+	Cs_2^+	Cs_3^+
α	5 (100 К)	6,8	3,6	8,7 (100 К)	34 (80 К)	1,7 (600 К)	0,2 (600 К)

Ион	O_4^+	N_4^+	$N_2O_2^+$	H_3O^+	$H_5O_2^+$	$H_7O_3^+$	$H_9O_4^+$	NH_4^+	NaO_2^+
α	23 (200 К)	15	17	10 (540 К)	20 (540 К)	34	36	18	50

Ион	$NaCO_2^+$	$H_{11}O_5^+$	$H_{13}O_6^+$	$NH_4 \cdot NH_3^+$	$NH_4(NH_3)_2^+$	$NH_4(NH_3)_3^+$	H_3^+	$CO \cdot CO^+$	H_5^+	$CO^+(CO)_2$
α	50	80	28	27	25	25	2,3	13	30	19

Таблица 18.13. **Энергетическая зависимость сечения и температурная зависимость константы скорости диссоциативной рекомбинации электронов и молекулярных ионов [16]**

Ион	σ, 10^{-15} см²	α, 10^{-7} см³/с	Примечание
H_2^+	$8\left(\frac{0,1}{\varepsilon_e}\right)^{0,92}$	$2,3\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,4}$	—
HD^+	$8\left(\frac{0,1}{\varepsilon_e}\right)^{0,92}$	$2,3\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,4}$	—
D_2^+	$5,5\left(\frac{0,1}{\varepsilon_e}\right)^{0,8}$	$1,6\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,3}$	—
CH^+	$8\left(\frac{0,1}{\varepsilon_e}\right)^{0,92}$	$3\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,4}$	—
NH^+	$2,5\left(\frac{0,1}{\varepsilon_e}\right)^{1,0}$	$0,86\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,5}$	—
OH^+	$2\left(\frac{0,1}{\varepsilon_e}\right)^{1,0}$	$0,75\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,5}$	—
C_2^+	$14\left(\frac{0,1}{\varepsilon_e}\right)^{1,0}$	$6\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,5}$	—
N_2^+	$10\left(\frac{0,1}{\varepsilon_e}\right)^{1,0}$	$3,5\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,5}$	—
NO^+	$5\left(\frac{0,1}{\varepsilon_e}\right)^{1,0}$	$2,3\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,5}$	—
O_2^+	$4,5\left(\frac{0,1}{\varepsilon_e}\right)^{1,0}$	$1,9\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,5}$	—

Ион	σ, 10^{-15} см^2	α, 10^{-7} см^3/с	Примечание
Ne_2^+	—	$1{,}8\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}43}\left(\frac{300}{T}\right)^{1{,}1}$	—
Ar_2^+	—	$9{,}1\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}61}\left(\frac{300}{T}\right)^{0{,}7}$	—
Kr_2^+	—	$16\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}55}$	—
Xe_2^+	—	$27\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}6}$	—
H_3^+	$10\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	$2{,}3\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}5}$	—
HD_2^+	$8\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	—	—
D_3^+	$6\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{0{,}84}$	—	—
CH_2^+	$13\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	$5{,}0\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}5}$	—
CH_3^+	$16\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	$7{,}0\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}5}$	$T_e < 2000$ K, $\varepsilon_e < 0{,}15$ эВ
	$6\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}6}$	—	$\varepsilon_e > 0{,}15$ эВ
CH_4^+	$14\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	$7{,}0\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}5}$	$\varepsilon_e < 0{,}07$ эВ, $T_e < 1000$ K
	$5{,}6\left(\frac{0{,}2}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}5}$	—	$\varepsilon_e > 0{,}07$ эВ
CH_5^+	$14\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	$7{,}0\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}5}$	$\varepsilon_e < 0{,}08$ эВ, $T_e < 1000$ K
	$5{,}6\left(\frac{0{,}2}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}5}$	—	$\varepsilon_e > 0{,}08$ эВ
NH_2^+	$30\left(\frac{0{,}04}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	—	$\varepsilon_e < 0{,}05$ эВ
	$9\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}35}$	—	$\varepsilon_e > 0{,}05$ эВ
NH_3^+	$31\left(\frac{0{,}07}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	—	$\varepsilon_e < 0{,}09$ эВ
	$6{,}5\left(\frac{0{,}2}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}8}$	—	$\varepsilon_e > 0{,}09$ эВ
NH_4^+	$11\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}4}$	$13\left(\frac{410}{T_e}\right)^{0{,}5}$	$\varepsilon_e < 0{,}5$ эВ

Ион	σ, 10^{-15} см^2	α, 10^{-7} см^3/с	Примечание
	$0{,}5\left(\frac{0{,}5}{\varepsilon_e}\right)^{3{,}43}$	—	$\varepsilon_e > 0{,}5$ эВ
H_2O^+	$18\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	—	$\varepsilon_e < 0{,}15$ эВ
	$6\left(\frac{0{,}2}{\varepsilon_e}\right)^{2{,}0}$	—	$\varepsilon_e > 0{,}15$ эВ
H_3O^+ (D_3O^+)	$18\left(\frac{0{,}08}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	$6{,}3\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}5}$	$\varepsilon_e < 0{,}1$ эВ, $T_e < 1000$ К
	$5\left(\frac{0{,}2}{\varepsilon_e}\right)^{2}$	—	$\varepsilon_e > 0{,}1$ эВ
C_2H^+	$14\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	$5{,}4\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}5}$	—
$C_2H_2^+$	$14\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	$5{,}4\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}5}$	$\varepsilon_e < 0{,}1$ эВ
	$60\left(\frac{0{,}2}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}2}$	—	$\varepsilon_e > 0{,}1$ эВ
$C_2H_3^+$	$20\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	$9\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}5}$	$\varepsilon_e < 0{,}1$ эВ
	$8{,}4\left(\frac{0{,}2}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}3}$	—	$\varepsilon_e > 0{,}1$ эВ
HCO^+	—	2,0	$T_e = 300$ К
N_2H^+ · (N_2O^+)	$12\left(\frac{0{,}1}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}0}$	$7{,}5\left(\frac{300}{T_e}\right)^{2{,}5}$	$\varepsilon_e < 0{,}1$ эВ
	$4{,}4\left(\frac{0{,}2}{\varepsilon_e}\right)^{1{,}3}$	—	$\varepsilon_e > 0{,}1$ эВ
CO_2^+	—	3,8	$T_e = 300$ К
H_5^+	—	36	$T_e = 205$ К
	—	25	$T_e = 300$ К
$H_3O^+ \cdot (H_2O)$	—	22	$T_e = 415$ К
$H_3O^+ \cdot (H_2O)_2$		38	$T_e = 300$ К
			$T_e = 300$ К
$H_3O^+ \cdot (H_2O)_3$	—	49	
$H_3O^+ \cdot (H_2O)_4$	—	60	$T_e = 205$ К
$H_3O^+ \cdot (H_2O)_5$	—	75	$T_e = 205$ К
$NH_4^+ \cdot (NH_3)$	—	$28\left(\frac{300}{T_e}\right)^{0{,}147}$	—

Ион	σ, 10^{-15} см^2	α, 10^{-7} см^3/с	Примечание
$NH_4^+ \cdot (NH_3)_2$	—	$27 \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,05}$	—
$NH_4^+ \cdot (NH_3)_3$	—	30	$T_e = 200$ K
N_4^+	—	$14 \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,41}$	—
$CO^+ \cdot (CO)$	—	$13 \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,34}$	—
$CO^+ \cdot (CO)_2$	—	$19 \left(\frac{300}{T_e}\right)^{0,33}$	—
$O_2^+ \cdot (O_2)$	—	23	$T_e = 205$ K

Таблица 18.14. **Константа скорости парной ион-ионной рекомбинации при $T = 300$ K. 10^{-7} см^3/с [17, 18]**

Пара	k [17]	Пара	k [18]
$H^+ + H^-$	8,6	$CCl_3^+ + Cl^-$	0,45
$O^+ + O^-$	1,4	$CCl_2F^+ + Cl^-$	0,41
$N^+ + O^-$	1,4	$CCl_2F_2^+ + Cl^-$	0,41
$O_2^+ + O_2^-$	4,2	$NH_4^+ + Cl^-$	0,67
$N_2^+ + O_2^-$	1,6	$Cl_2^+ + Cl^-$	0,5
$NO^+ + NO_2^-$	3,4	$O_2^+ + CO_3^-$	0,95
$O_2^+ + NO_2^-$	4,1	$CF_3^+ + F^-$	0,58
$NO^+ + NO_3^-$	0,45	$NF_2^+ + F^-$	0,75
$O^+ + O_2^-$	2	$N_2F^+ + F^-$	0,85
$Na^+ + O^-$	1,3	$H_3O^+(H_2O)_3 + NO_3^-$	0,55
$O_2^+ + O^-$	1,2	$H_3O^+(H_2O)_3 + NO_3^- \, HNO_3$	0,57
$NO^+ + O^-$	1,2	$NO^+(NO_2)_2 + NO_3^- \, (HNO_3)_3$	0,35
$SF_3^+ + SF_5^-$	0,4	$NH_4^+(NH_3)_2 + Cl^-$	0,79
$SF_5^+ + SF_6^-$	0,4	$NH_4^+(NH_3)_2 + NO_2^-$	0,49
$CCl_2^+ + Cl^-$	0,45	$H_3O^+(H_2O)_3 + Cl^-$	0,68

Таблица 18.15. **Коэффициент тройной ион-ионной рекомбинации при различных значениях концентрации атомов инертного газа при $T = 300$ K, 10^{-6} см^3/с [19]**

Пара	Инертный газ	Концентрация атомов инертного газа, 10^{19} см$^{-3}$							
		0,27	0,81	2,7	5,4	10,8	27	54	135
$Kr^+ + F^-$	Ne	0,19	0,52	1,5	2,4	3,0	2,1	1,2	0,45
	Ar	0,33	0,84	2,2	2,7	2,2	1,0	0,49	0,20
	Kr	0,36	0,93	2,2	2,1	0,91	0,56	0,2	0,13
	Xe	0,47	1,2	2,4	2,0	0,8	0,47	0,26	0,09
$Kr_2^+ + F^-$	Ne	0,18	0,48	1,4	2,1	2,6	2,0	1,2	0,45
	Ar	0,29	0,73	1,8	2,5	2,0	0,95	0,48	0,19
	Kr	0,33	0,85	2,0	2,2	1,5	0,60	0,3	0,13
	Xe	0,37	0,96	2,0	1,8	1,1	0,44	0,23	0,09
$Xe^+ + Cl^-$	Ne	0,12	0,3	0,86	1,6	2,3	2,1	1,3	0,50
	Ar	0,26	0,68	1,7	2,2	1,8	0,8	0,41	0,17
	Kr	0,31	0,80	1,8	1,9	1,3	0,54	0,27	0,12
	Xe	0,36	0,88	1,7	1,4	0,8	0,34	0,17	—
$Xe_2^+ + Cl^-$	Ne	0,11	0,30	0,80	1,4	2,0	20	1,2	0,48
	Ar	0,23	0,60	1,5	1,9	1,8	0,81	0,42	0,17
	Kr	0,27	0,70	1,6	1,8	1,3	0,52	0,27	0,11
	Xe	0,30	0,80	1,6	1,5	0,9	0,40	0,19	—

Таблица 18.16. **Сечение диссоциативного прилипания электрона к молекуле SO_2, отвечающее образованию отрицательных ионов различного сорта, 10^{-18} см^2 [23]**

Энергия электрона, эВ	Сорт отрицательного иона		
	O^-	S^-	SO^-
2,5	0,01	0,0	0,0
3,0	0,10	0,013	0,02
3,1	0,16	0,019	0,0
3,2	0,22	0,034	0,03
3,3	0,36	0,056	0,03
3,4	0,58	0,079	0,16
3,5	0,89	0,122	0,16
3,6	1,34	0,167	0,36
3,7	2,20	0,225	0,54
3,8	3,16	0,276	0,84
3,9	4,38	0,298	1,41
4,0	5,58	0,313	2,05
4,1	6,92	0,310	3,27
4,2	7,52	0,295	4,58
4,3	8,08	0,271	6,94
4,4	8,02	0,246	8,51
4,5	7,22	0,231	10,10
4,6	6,48	0,191	10,80
4,7	5,48	0,162	10,98
4,8	4,69	0,164	10,53
4,9	3,79	0,131	9,07
5,0	2,14	0,114	7,76
5,1	2,56	0,091	5,86
5,2	1,90	0,065	4,84
5,4	1,12	0,044	2,80
5,6	0,69	0,028	1,21
5,8	0,45	0,013	0,62
6,0	0,43	0,015	0,39
6,2	0,81	0,008	0,33

Продолжение табл. 18.16

Энергия электрона, эВ	Сорт отрицательного иона		
	O^-	S^-	SO^-
6,3	0,86	0,018	0,46
6,4	1,17	0,017	0,40
6,5	1,32	0,020	0,58
6,6	1,59	0,022	0,44
6,7	1,80	0,019	0,52
6,8	2,10	0,017	0,58
6,9	2,33	0,025	0,41
7,0	2,56	0,027	0,42
7,1	2,68	0,026	0,40
7,2	2,41	0,030	0,42
7,3	2,47	0,031	0,51
7,4	2,41	0,031	0,44
7,5	2,14	0,036	0,51
7,6	1,89	0,030	0,43
7,7	1,56	0,029	0,33
7,8	1,33	0,027	0,28
7,9	1,06	0,016	0,21
8,0	0,93	0,015	0,21
8,1	0,76	0,015	0,13
8,2	0,61	0,015	0,11
8,3	0,50	0,013	0,05
8,4	0,35	0,013	0,0
8,5	0,27	0,014	0,01
8,6	0,25	0,016	0,0
8,7	0,14	0,026	—
8,8	0,09	0,021	—
8,9	0,07	0,030	—
9,0	0,04	0,027	—
9,1	0,04	0,026	—
9,2	0,02	0,017	—
9,3	0,01	0,015	—
9,5	0,01	0,002	—

Таблица 18.17. **Константа скорости диссоциативного прилипания электронов к молекулам в электрическом поле, 10^{-10} см^3/с [23—25]**

Молекула	E/N, 10^{16} В·см^2											
	0,2	0,5	1	5	10	15	20	25	30	40	50	60
SF_6	—	—	—	6,3	7	7,8	7,3	6,8	6,8	6,7	6,5	5,8
CF_4	—	—	—	0,39	0,68	0,68	0,64	0,5	0,46	—	—	—
C_2F_6	—	—	—	—	—	—	—	2,7	2,6	1,5	0,65	—
C_3F_8	—	—	—	—	—	—	—	3,0	2,4	1,8	1,0	—
C_4F_{10}	—	—	—	—	—	—	—	3,3	2,3	1,0	0,6	—
CCl_2F_2	—	—	—	—	—	—	—	—	4,6	4,6	3,9	2,5
H_2O	—	—	—	0,017	0,8	1,0	0,78	—	—	—	—	—
N_2O	$6,5\cdot10^{-6}$	$1,2\cdot10^{-4}$	0,001									
HCl	1,6	2,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HBr	34	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HI	53	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 18.18. **Коэффициент диссоциативного прилипания электрона к молекулам в электрическом поле, 10^{-10} см^3/с [23—25]**

Молекула	Средняя энергия электронов, эВ							
	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	3
CCl_4	700	450	350	—	—	—	—	—
$CHCl_3$	150	195	130	80	—	—	—	—
CH_2Cl_2	35	90	120	110	—	—	—	—
C_2HCl_3	40	80	95	70	—	—	—	—
1-1-1-$C_2H_3Cl_3$	44	50	52	36	—	—	—	—
1-1-2-$C_2H_3Cl_3$	16	35	40	30	—	—	—	—
CH_3Br	0,48	0,2	0,1	0,022	0,0075	0,0016	—	—
C_2H_5Br	0,19	0,65	0,84	0,63	0,34	0,16	0,075	—
н-C_3H_7Br	0,23	0,67	1,0	0,65	0,32	0,17	0,085	—
изо-C_4H_9Br	0,33	0,85	1,2	0,75	0,40	0,18	0,12	—
изо-$C_5H_{16}Br$	0,45	1,0	1,4	0,8	0,42	—	—	—
изо-$C_6H_{13}Br$	0,48	1,2	1,5	0,9	0,5	0,3	0,2	—
цис-C_4F_6	320	130	68	40	—	—	—	—
2-C_4F_6	370	420	400	300	—	—	—	—
1,3-C_4F_6	570	300	190	135	—	—	—	—
цис-C_4F_8	390	350	260	170	—	—	—	—
2-C_4F_8	300	230	170	120	—	—	—	—
цис-C_5F_8	1000	480	310	210	—	—	—	—
цис-C_6F_{10}	980	480	300	200	—	—	—	—
цис-C_6F_{12}	940	540	330	220	—	—	—	—
C_7F_8	1000	540	330	220	—	—	—	—
C_8F_{16}	930	540	330	220	—	—	—	—
цис-C_7F_{14}	200	150	100	70	—	—	—	—
цис-C_7F_{14}	1200	800	500	320	—	—	—	—
CCl_3F	500	220	100	—	—	—	—	—
CCl_2F_2	15	18	20	14	—	—	—	—
$CClF_3$	—	0,027	0,16	0,3	—	—	—	—
CO_2	—	—	—	—	0,0003	0,0011	0,009	—
F	130	90	60	45	25	20	16	14
Br_2	0,65	1,3	1,5	—	—	—	—	—
HBr	4	8,6	7,6	6,2	4,6	—	—	—

Таблица 18.19. **Константа скорости тройного прилипания электрона к молекуле (T = 300 K) k, 10^{-31} см^6/с [17]**

Третья частица	k	Третья частица	k
Молекула O_2			
He	0,45	Xe	0,85
Ne	0,23	H_2	4,8
Ar	0,5	D_2	1,4
Kr	0,5	N_2	1,1

Продолжение табл. 18.19

Третья частица	k	Третья частица	k
H_2O	143	Молекула CO	
CO_2	31	CO	2,7
H_2S	100	Молекула N_2O	
NH_3	75	N_2O	0,06
C_2H_4	25	N_2	0,03

Таблица 18.20. **Константа скорости разрушения отрицательного иона при соударении с атомной частицей (T = 300 K) [17]**

Реакция	Дефект энергии, эВ	Константа скорости, 10^{-12} см^3/с
$H^- + H \rightarrow H_2 + e$	3,8	1800
$H^- + O_2 \rightarrow H_2O + e$	1,25	1200
$H^- + NO \rightarrow HNO + e$	1,4	500

Продолжение табл. 18.20

Реакция	Дефект энергии, эВ	Константа скорости, 10^{-12} см^3/с
$H^- + CO \rightarrow HCO + e$	0,54	50
$O^- + O \rightarrow O_2 + e$	3,6	200
$O^- + N \rightarrow NO + e$	5,1	200
$O^- + H_2 \rightarrow H_2O + e$	3,1	600
$O^- + NO \rightarrow NO_2 + e$	1,4	200

Продолжение табл. 18.20

Реакция	Дефект энергии, эВ	Константа скорости, 10^{-12} см³/с
$O^- + CO \rightarrow CO_2 + e$	4,0	600
$O^- + SO_2 \rightarrow SO_3 + e$	2,1	2000
$O^- + C_2H_4 \rightarrow C_2H_4O + e$	1,2	800
$O^- + O_2(^1\Delta g) \rightarrow O_3 + e$	0,5	300
$O_2^- + O_2 \rightarrow 2O_2 + e$	—0,43	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$ 0,03 (600 K)
$O_2^- + N_2 \rightarrow O_2 + N_2 + e$	—0,43	0,00018 (600 K)
$O_2^- + O \rightarrow O_3 + e$	0,6	300
$O_2^- + N \rightarrow NO_2 + e$	4,0	400
$O_2^- + O_2(^1\Delta_g) \rightarrow 2O_2 + e$	0,6	200
$Cl^- + H \rightarrow HCl + e$	0,7	900
$OH^- + O \rightarrow HO_2 + e$	0,9	200
$OH^- + H \rightarrow H_2O + e$	3,2	1000
$CN^- + H \rightarrow HCN + e$	1,5	1000
$S^- + O_2 \rightarrow SO_2 + e$	3,8	30
$S^- + CO \rightarrow COS + e$	1,6	300
$C^- + CO \rightarrow C_2O + e$	2,0	400

Продолжение табл. 18.20

Реакция	Дефект энергии, эВ	Константа скорости, 10^{-12} см³/с
$C^- + CO \rightarrow 2CO + e$	4,3	500
$C^- + N_2O \rightarrow CO + N_2 + e$	8,2	900
$C^- + N_2O \rightarrow CN + NO + e$	1,6	
$F^- + H \rightarrow HF + e$	2,5	1600
$Cl^- + H \rightarrow HCl + e$	0,7	1000
$I^- + H \rightarrow HI + e$	~0	60
$Cl^- + N \rightarrow ClN + e$	0,7	10
$Cl^- + O \rightarrow ClO + e$	0,9	10
$NO^- + He \rightarrow NO + He + e$	—0,02	0,27
$NO^- + H \rightarrow NO + He + e$	—0,02	0,035
$NO^- + H_2 \rightarrow NO + H_2 + e$	—0,02	0,26
$NO^- + NO \rightarrow 2NO + e$	—0,02	6
$NO^- + CO \rightarrow NO + CO + e$	—0,02	0,55
$NO^- + N_2O \rightarrow NO + N_2O + e$	—0,02	6,1
$NO^- + CO_2 \rightarrow NO + CO_2 + e$	—0,02	9,5
$NO^- + NH_3 \rightarrow NO + NH_3 + e$	—0,02	22
$CN^- + H \rightarrow HCN + e$	1,0	800
$HS^- + H \rightarrow H_2S + e$	1,7	1300

Таблица 18.21. **Сечение тушения резонансно-возбужденных атомов щелочных металлов молекулами ($T = 400 \div 500$ K), 10^{-16} см²** [14]

Тушащая молекула	Na	K	K	K	Rb		Cs	
	^2P	$^2P_{1/2}$	$^2P_{3/2}$	^2P	$^3P_{1/2}$	$^2P_{3/2}$	$^2P_{1/2}$	$^2P_{3/2}$
N_2	39	35	39	26	47	40	66	67
H_2	17	7	4	7	6	3	7	5
HD	11	11	14	12	6	5	8	7
D_2	10	2	1	8	3	5	4	3
CO	88	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 18.22. **Сечение тушения резонансно-возбужденных атомов при соударении с молекулами в пламенах ($T = 1400 \div 1800$ K), 10^{-16} см²** [4]

Тушащая молекула	Li(2^2P)	Na(3^2P)	K(4^2P)	Rb(5^2P)	Cs(6^2P)	Tl(7^2S)	Rb(7^2P_1)
H_2	16,3	8,6	3,3	3,0	5,2	0,2	1,3
N_2	12,2	22	19	22	48	20	18
O_2	—	36	52	84	—	41	47
CO	40	40	42	37	—	43	41
CO_2	29	51	67	75	—	102	91
H_2O	6	2	2,9	4,0	13	5,5	25
D_2	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 18.23. **Константа скорости тушения возбужденных атомов и молекул инертных газов при столкновениях с атомами и молекулами, 10^{-11} см³/с ($T = 300$ K)** [14]

Тушащая частица	Ne ($^3P_2$)	Ar ($^3P_2$)	Ar ($^3P_0$)	Kr ($^3P_2$)	Xe ($^3P_2$)	He_2 ($^3\Sigma_u^+$)	Ar ($^3P_1$)	Ar ($^1P_1$)
He*	—	—	—	—	—	—	—	—
Ne	0,00072	—	—	—	—	0,44	—	—
Ar	—	0,00011	0,00057	—	—	3,1	—	—
Kr	—	—	—	—	—	—	0,9	0,1
Xe	—	—	—	—	0,00023	—	22	33

* Константа скорости тушения процесса $He(2^1S) + He(^1S_0) \rightarrow 2He(^1S_0)$ равна $0{,}00036 \cdot 10^{-11}$ см³/с.

Тушащая частица	Ne ($^3P_2$)	Ar ($^3P_2$)	Ar ($^3P_0$)	Kr ($^3P_2$)	Xe ($^3P_2$)	He_2 ($^3\Sigma_u^+$)	Ar ($^3P_1$)	Ar ($^1P_1$)
H_2	5	8,7	7,8	3	1,6	—	20	25
D_2	—	6,5	7,8	2,5	—	—	—	—
N_2	8,4	3,6	1,6	0,4	1,9	3,0	0,9	4,7
O_2	—	17	24	16	22	—	25	31
CO	5,4	1,6	13	5,8	3,6	5,6	5,0	9,0
NO	—	20	25	19	27	—	35	56
Cl_2	41	71	72	73	72	—	—	—
F_2	41	75	90	72	75	—	—	—
HCl	17	—	—	—	—	—	—	—
HI	—	75	—	—	—	—	—	—
HBr	—	52	—	—	—	—	—	—
CO_2		54	59	40	45	9,5	50	74
N_2O	22	44	48	31	44	—	45	58
NF_3	7,8	14	7	12	9	—	—	—
N_2F_4	14	3	—	33	—	—	—	—
CH_4	—	50	55	37	33	6,1	—	—
SF_6	—	27	17	18	23	—	63	65
C_2H_4	—	—	—	—	—	—	56	103

Таблица 18.24. **Константа скорости тушения метастабильных атомов и молекул кислорода и азота при столкновениях, 10^{-14} см^3/с ($T = 300$ К)** [14]

Тушащая частица	O_2 ($^1\Delta_g$)	O_2 ($^1\Sigma_g^+$)	O (^1S)	O (^1D)	N(^2D)	N(^2P)	N_2 ($A^3\Sigma_u^+$)
Ar	—	—	0,039	—	—	0,07	—
N_2	—	0,23	—	6100	1,5	6	—
O_2	0,00019	0,02	30	5400	690	6	—
H_2	0,00027	52	0,058	$2\cdot10^4$	290	0,19	0,27
D_2	0,004	—	—	$1,5\cdot10^4$	—	—	—
NO	2500	5	$4\cdot10^4$	$1,7\cdot10^4$	9200	3300	6600
CO	—	0,3	—	7000	405	90	440
CO_2	—	19	30	1900	43	0,12	—
N_2O	—	—	940	$1,3\cdot10^4$	—	—	—
H_2O	—	330	$4,2\cdot10^4$	$1,2\cdot10^4$	—	—	—
O_3	0,47	1900	$6,9\cdot10^4$	$1,9\cdot10^4$	—	—	—

Таблица 18.25. **Сечение тушения возбужденного атома Hg (6^3P_1) при соударении с атомами и молекулами ($T \approx 300$ К)** [14]

Тушащая частица	H_2	D_2	O_2	N_2	CO	CO_2	Xe
σ, 10^{-16} см^2	22	22	57	0,9	19	9	0,002

18.8. ПРОЦЕССЫ ТУШЕНИЯ ВОЗБУЖДЕННЫХ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Сечения и константы скорости этих процессов представлены в табл. 18.21—18.29. Погрешность приводимых данных достигает 50%.

Таблица 18.26. **Константа скорости тушения некоторых электронно-возбужденных атомов, радикалов и молекул, 10^{-10} см^3/с ($T = 300$ К) [14, 22]**

Возбужденная частица	Тушащая частица										
	Ar	N_2	O_2	Cl_2	CO	CO_2	CF_4	SF_6	CCl_4	SiF_4	D_2
Ar ($4d$ [3/2])	1,9	1,6	1,3	1,3	2,3	1,6	3,3	5,1	2,2	1,6	—
F ($3p^2\ P_{3/2}$)	0,4	0,3	0,3	1,5	0,5	0,6	0,6	0,9	0,3	0,6	—
F ($3p^4\ D_{7/2}$)	1,2	1,0	0,8	1,9	1,5	1,8	1,8	2,6	0,9	1,8	—
O ($3p^5\ P$)	—	2,0	1,7	3,7	3,0	3,5	4,2	4,8	3,1	3.1	—
CO ($B^1\ \Sigma$)	1,3	1,1	0,9	—	1,7	1,8	2,5	3,3	3,1	2,0	—
N_2 ($C^3\ \pi_u$)	0,4	0,1	0,3	—	0,6	0,6	0,9	1,1	1,0	0,7	—
CF_2 ($^1B_2$)	—	0,2	—	—	—	—	0,05	—	—	—	—
OH ($A^2\ \Sigma^+$)	0,22	—	—	—	3	1,3	—	—	—	—	—
CO ($a^3\ \Pi$)	1,8	0,15	1,5	—	12,6	0,16	—	—	—	—	1,6
NH ($b^1\ \Sigma^+$)	$2{,}5\cdot10^{-6}$	$4{,}5\cdot10^{-6}$	$2{,}4\cdot10^{-5}$	—	—	—	—	—	—	—	—
ND ($b^1\ \Sigma^+$)	$5\cdot10^{-8}$	$3{,}8\cdot10^{-7}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CH ($c^2\ \Sigma^+$)	—	0,0007	—	—	0,048	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 18.26

Возбужденная частица	Тушащая частица										
	NO	O (^3P)	CH_4	C_2H_4	He	N (^4S)	H_2	NH_3	ND_3	H_2O	NO_2
Ar ($4d$ [3/2])	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F ($3p^2\ P_{3/2}$)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F ($3p^4\ D_{7/2}$)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
O ($3p^5\ P$)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CO ($B^1\ \Sigma$)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N_2 ($C^3\ \Pi_u$)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CF_2 ($^1B_2$)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
OH ($A^2\ \Sigma^+$)	—	—	—	—	—	—	0,92	—	—	5	3,5
CO ($a^3\Pi$)	2,4	1,9	3,1	5,9	—	—	—	—	—	—	—
NH ($b^1\ \Sigma^+$)	—	0,18	—	—	$7\cdot10^{-7}$	0,34	0,01	0,0039	—	—	—
ND ($b^1\ \Sigma^+$)	—	—	—	—	$5\cdot10^{-8}$	—	0,009	—	$5{,}2\cdot10^{-4}$		—
CH ($c^2\ \Sigma^+$)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,45	—

Таблица 18.27. **Константа скорости образования эксимерных молекул при парной реакции замещения, 10^{-10} см^3/с ($T = 300$ К) [26]**

Реакция	Константа скорости
$Ar(^3P_2) + F_2 \rightarrow ArF^* + F$	9,0
$Ar(^3P_2) + NF_3 \rightarrow ArF^* + NF_2$	1,0
$Ar(^3P_2) + Cl_2 \rightarrow ArCl^* + Cl$	7,1
$Kr(^3P_2) + F_2 \rightarrow KrF^* + F$	6,2
$Kr(^3P_2) + NF_3 \rightarrow KrF^* + NF_2$	1,0
$Kr(^3P_2) + OF_2 \rightarrow KrF^* + OF$	5,3
$Kr(^3P_2) + Cl_2 \rightarrow KrCl^* + Cl$	7,3
$Xe(^3P_2) + F_2 \rightarrow XeF^* + F$	7,5
$Xe(^3P_2) + NF_3 \rightarrow XeF^* + NF_2$	0,9
$Xe(^3P_2) + OF_2 \rightarrow XeF^* + OF$	5,7
$Xe(^3P_2) + Cl_2 \rightarrow XeCl^* + Cl$	7,2
$Xe(^3P_2) + Br_2 \rightarrow XeBr^* + Br$	10

Таблица 18.28. **Константа скорости k образования эксимерной молекулы при тройном столкновении $A^* + B + C \rightarrow AB^* + C$, 10^{-33} см^6/с ($T = 300$ К) [26]**

A*	B	C	Эксимерная молекула	k
He ($2\ ^3S$)	He	He	He_2^*	0,23
Ne ($^3P_2$)	Ne	Ne	Ne_2^*	0,5
Ne ($^3P_0$)	Ne	Ne	Ne_2^*	0,07 (77 К)
Ne ($^1P_1$)	Ne	Ne	Ne_2^*	5,8
Ar ($^3P_2$)	Ar	Ar	Ar_2^*	10
Ar ($^1P_1$)	Ar	Ar	Ar_2^*	14
Ar ($^3P_1$)	Ar	Ar	Ar_2^*	12
Kr ($^3P_2$)	Kr	Kr	Kr_2^*	36
Kr ($^3P_0$)	Kr	Kr	Kr_2^*	54

Продолжение табл. 18.28

A*	B	C	Эксимерная молекула	k
Kr ($^3P_1$)	Kr	Kr	Kr_2^*	30
Kr ($^1P_1$)	Kr	Kr	Kr_2^*	1,6
Xe ($^3P_2$)	Xe	Xe	Xe_2^*	55
Xe ($^3P_0$)	Xe	Xe	Xe_2^*	40
Xe ($^3P_1$)	Xe	Xe	Xe_2^*	70
Hg ($^3P_0$)	Hg	Hg	Hg_2^*	250 (470 K)
Hg ($^3P_1$)	Hg	Hg	Hg_2^*	160
Cs (6^2P)	Cs	Xe	Cs_2^*	4200 (620 K)
Xe ($^3P_2$)	Xe	He	Xe_2^*	160 (670 K)
Xe ($^3P_2$)	Xe	Ne	Xe_2^*	14
Xe ($^3P_2$)	Xe	Ar	Xe_2^*	26
Kr ($^3P_2$)	Ar	Ar	KrAr*	1,0
Xe ($^3P_2$)	Ar	Ar	XeAr*	0,7
Hg ($^3P_0$)	Hg	N_2	Hg_2^*	1000 (430 K)
Hg_2 (O^+g)	Hg	N_2	Hg_3^*	200
Ne ($^1P_1$)	Ne	Ne	Ne_2^*	5,8
Ar ($^3P_1$)	Ar	Ar	Ar_2^*	12
ArF ($B_{1/2}$)	Ar	Ar	Ar_2F^*	490
KrF ($B_{1/2}$)	Ar	Ar	ArKrF*	90
KrF ($B_{1/2}$)	Kr	Ar	Kr_2F^*	600
KrF ($B_{1/2}$)	Kr	Kr	Kr_2F^*	600
XeF ($B_{1/2}$)	Xe	Ne	Xe_2F^*	780
XeF ($B_{1/2}$)	Xe	Xe	Xe_2F^*	260

Таблица 18.29. **Константа скорости тушения эксимерных молекул k, 10^{-12} см^3/с (T = 300 K)** [26]

Эксимерная молекула	Тушащая частица	k	Эксимерная молекула	Тушащая частица	k
ArF ($B_{1/2}$)	Ar	9	KrF ($B_{1/2}$)	Ar	5
	Kr	1600		Kr	3,6
	Xe	4500		F_2	650
	F_2	1900		KrF	370
				NF_3	52

Продолжение табл. 18.29

Эксимерная молекула	Тушащая частица	k	Эксимерная молекула	Тушащая частица	k
XeF ($B_{1/2}$)	He	1,2		Kr	0,073
	Ne	0,77		Xe	0,31
	Ar	2,7		N_2	0,061
	Xe	45		Cl_2	170
	N_2	7,0		CCl_4	160
	F_2	470	HgBr ($B_{1/2}$)	He	0,044
	CO_2	250		Ar	0,072
	XeF	305		Xe	0,31
	NF_3	18		N_2	0,13
XeF ($C_{3/2}$)	He	0,12		Br_2	290
	Ne	0,3		HBr	130
	Ar	0,09		CF_3Br	87
	Xe	1,0		CCl_3Br	180
	N_2	0,4			
	F_2	80	HgI ($B_{1/2}$)	Ar	0,11
	XeF_2	240		Xe	0,22
	NF_3	16		CF_3I	290
XeCl ($B_{1/2}$)	Ne	1,0	HgI ($C_{3/2}$)	He	3,8
	Xe	32		Ne	5,1
	HCl	1400		Ar	16
				Xe	41
XeBr ($B_{1/2}$)	Br_2	800		N_2	24
XeI ($B_{1/2}$)	Xe	9	Ar_2F ($^2B_2$)	He	0,005
	I_2	500		Ar	0,022
	CH_3I	360		F_2	210
HgCl ($B_{1/2}$)	He	0,041		NF_3	300
	Ne	0,033			
	Ar	0,05	Kr_2F ($^2B_2$)	F_2	880

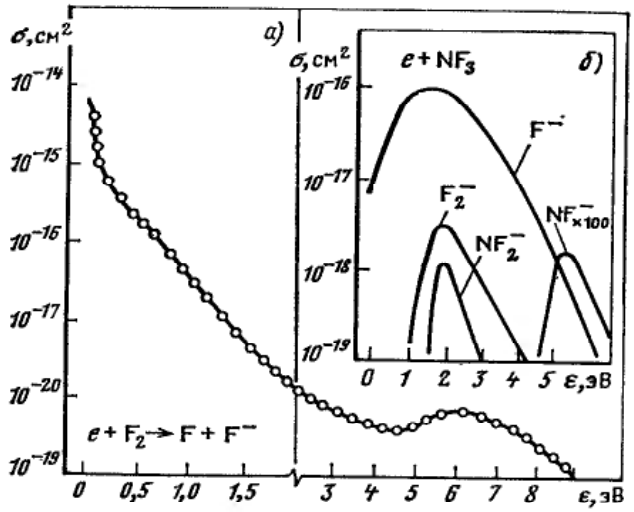


Рис. 18.4. Сечение диссоциативного прилипания электрона к молекуле F_2 (*а*) и NF_3 (*б*) [23]

18.9. ФОТОИОНИЗАЦИЯ И ФОТОРЕКОМБИНАЦИЯ

При фотоионизации

$$A + \hbar\omega \rightarrow A^+ + e \qquad (18.18)$$

энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или молекулы, содержится в излученин. Сечение фото-

ионизации атомов вблизи порога не зависит от энергии фотона, поэтому пороговое значение сечения фотоионизации служит основной характеристикой этого процесса, используемой при описании явлений в низкотемпературной плазме. На рис. 18.5 показана зависимость сечения фотоионизации атома гелия от длины волны налетающего фотона [28]

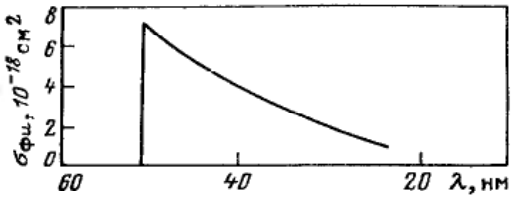


Рис. 18.5. Зависимость сечения фотоионизации атома гелия от длины волны падающего излучения [28]

Таблица 18.30. **Пороговые значения сечения фотоионизации некоторых атомов [28]**

Атом	Пороговая длина волны, нм	Сечение, 10^{-18} см^2
H	91,2	6,3
He	50,4	7,4
Li	230	2,5
Be	133	8,2
B	149	19
C	110	11
N	85,2	9
O	91	2,6
F	71,3	6
Ne	57,5	4
Na	241,2	0,12
Mg	162	1,2
Ar	78,7	35
K	286,0	0,012
Ca	202,8	0,45
Ga	207	0,2
Kr	84,5	35
Rb	297	0,11
In	214	0,3
Cs	318,5	0,22
Tl	203	4,5

В табл. 18.30 приведены пороговые значения сечения фотоионизации атомов [29].

Сечение фотоионизации атома водорода фотонами, энергия которых много больше энергии связи электрона в атоме (13,6 эВ), дается следующим выражением [31], см^2:

$$\sigma_{фп} = 23{,}8\lambda^{7/2}, \qquad (18.19)$$

где λ — длина волны налетающего фотона, см. Сечение фотоионизации сильновозбужденного атома, см^2, с эффективным значением главного квантового числа n^* дается формулой Крамерса [30]

$$\sigma_{фи} = 0{,}022\lambda^3/n^{*5}. \qquad (18.20)$$

Процессом, обратным процессу фотоионизации (18.18), является фоторекомбинация. Сечение фоторекомбинации электрона и иона в высоковозбужденное состояние атома, см^2, с эффективным значением главного квантового числа n^* описывается соотношением, которое следует из формулы Крамерса (18.20),

$$\sigma_{фр} = \frac{2\cdot 10^{-16}\lambda}{\varepsilon n^{*3}}, \qquad (18.21)$$

где ε — энергия электрона, эВ. На рис. 18.6 представлена температурная зависимость коэффициента фоторекомбинации электрона и протона в водородной плазме [32]

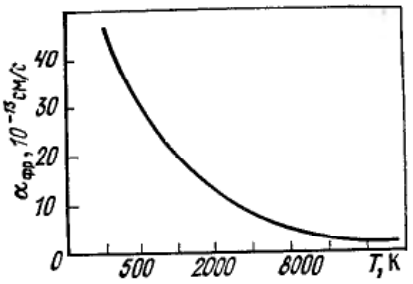


Рис. 18.6. Температурная зависимость коэффициента фоторекомбинации электрона и протона в водородной плазме [32]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М.** Явления переноса в слабоионизованной плазме. М.: Атомиздат. 1975.
2. **Елецкий А. В.**//Успехи физ. наук. 1981. Т. 134. С. 237—266.
3. **Rich J. W.**//Appl. Atomic Collision Physics. Vol. 3. Gas Lasers, N. Y.: Academ. Press, 1982. P. 99—140.
4. **Andrews A. J., Simpson C. J. S. M.**//Chem. Phys. Lett., 1975, Vol. 36. P. 271—275.
5. **Drosdoski W. S. e. a.**//J. Chem. Phys. 1976. Vol. 65. P. 1542—1551.
6. **Bohringer H. e. a.**//Ibid. 1983. Vol. 79. P. 420—429.
7. **Wilkins R. L.**//Ibid. 1975. Vol. 63. P. 534—540.
8. **Macdonald R. G., Moore C. B.**//Ibid. 1980. Vol. 73. P. 1681—1690.
9. **Wilkins R. L., Kwok M. A.**//Ibid. 1980. Vol. 73. P. 3198—3206.
10. **Dzelkalns L. S., Kaufman F.**//Ibid. 1983. Vol. 79. P. 3836—3847.
11. **Смирнов Б. М.**//Успехи физ. наук. 1981. Т. 133. С. 569—592.
12. **Елецкий А. В., Смирнов Б. М.**//Основы физики плазмы/Под ред. Р. З. Сагдеева и М. Розенблюта. М.: Энергоатомиздат, 1983. Т. 1. С. 58.
13. **Ключарев А. Н., Безуглов Н. Н.** Процессы возбуждения и ионизации атомов при поглощении света. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.
14. **Смирнов Б. М.** Возбужденные атомы. М.: Энергоатомиздат, 1982.
15. **Елецкий А. В., Смирнов Б. М.**//Успехи физ. наук. 1982. Т. 136. С. 25—57.
16. **Mitchel J. B. A., McGowan P. W.**//Physics of Ion—Ion and Electron—Ion Collisions. N. Y., Lond.: Plenum Press. 1983. P. 279—344
17. **Смирнов Б. М.** Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1978; Смирнов Б. М. Асимптотические методы в теории атомных столкновений. М.: Атомиздат, 1973.
18. **Smith D., Adams N. G.**//Physics of Ion—ion and

Electron—Ion Collisions, N. Y., Lond.: Plenum Press. 1983. P. 501—548.
19. **Flannery M. R.**//Appl. Atomic Collision Physics. Vol. 3. Gas Lasers. N. Y.: Academ. Press. 1982. P. 141—184.
20. **Думан Е. Л. и др.** Препринт ИАЭ им. И. В. Курчатова № 3532/12, 1982.
21. **Смирнов Б. М.**//Успехи физ. наук. 1977. Т. 121. С. 231—259.
22. **Словецкий Д. И.**//Химия плазмы/Под ред. Б. М. Смирнова, М.: Энергоатомиздат. 1983. Вып. 10. С. 108—144.
23. **Chantry P. J.**//Applied Atomic Collision Physics. Gas Lasers. N. Y.: Academ. Press. 1982. Vol. 3. P. 35—97.
24. **Orient O. J., Srivastava S. K.**//J. Chem. Phys. 1983. Vol. 78. P. 2949—2957.
25. **Gallagher J. W. e. a.**//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1983. Vol. 12. P. 109—143.
26. **Смирнов Б. М.**//Успехи физ. наук. 1983. Т. 139. С. 53—89.
27. **Хаксли Л., Кромптон Р.** Диффузия и дрейф электронов в газах: Пер. с англ. М.: Мир. 1977. Гл. 14.
28. **Weissler G. L.**//Handbuch der Physik. Bd XXI. Berlin: Springer. 1956.
29. **Хастед Дж.** Физика атомных столкновений: Пер. с англ. М.: Мир. 1965.
30. **Kramers H. A.**//Phil. Mag. 1923. Vol. 46. P. 836—848.
31. **Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П.** Релятивистская квантовая теория. М.: Наука, 1968. Ч. 1. С. 234.
32. **Бейтс Д., Далгарно А.**//Атомные и молекулярные процессы/Под ред. Д. Бейтса; Пер. с англ. М.: Мир. 1964. С. 227—255.

ГЛАВА 19

ИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

А. А. Радциг, В. М. Шустряков

19.1. ВВЕДЕНИЕ

Круг процессов, охватывающих ионизацию веществ, крайне широк и разнообразен. В различных ситуациях может представить интерес ионизация атомов и молекул вещества под действием падающих заряженных и нейтральных частиц, фотонов, наложенного внешнего поля и др. Не делая попытки отразить это многообразие процессов, мы представим ниже достаточно полную информацию о важнейшей пороговой характеристике рассматриваемого процесса — потенциале ионизации атомов, атомных ионов и молекул — и приведем данные о сечении ионизации атомов и молекул электронами, т. е. ограничим свое рассмотрение наиболее распространенным способом образования ионов и электронов в плазме.

Кроме того, будет представлена информация об энергии связи электронов в отрицательных ионах и энергии, высвобождающейся при присоединении протона к атомной или молекулярной частице. Наконец, подробно рассмотрим вопрос об энергии связи электронов во внутренних оболочках атомных частиц.

Отметим также, что процессы фотоионизации атомов и молекул и процессы пеннинговской и ассоциативной ионизации атомных частиц при столкновениях с возбужденными атомами затронуты в гл. 18.

19.2. ПОТЕНЦИАЛ ИОНИЗАЦИИ АТОМНЫХ И МОЛЕКУЛЯРНЫХ ЧАСТИЦ

Потенциалом ионизации частицы называют ту минимальную энергию, которая затрачивается на перевод ее валентного электрона в непрерывный спектр. В табл. 19.1 представлены значения потенциала ионизации нейтральных атомных частиц, полученные главным образом в результате экстраполяции к границе непрерывного спектра атома серий оптических переходов, инициируемых с помощью различных источников возбуждения. При этом либо находят предельное значение известной функции (например, формулы Ритца), аппроксимирующей высоковозбужденные (ридберговские) уровни энергии атомной частицы, либо сравнивают реальные уровни с водородоподобными, внося поправки на поляризацию атомного остова [1]. Поэтому помимо потенциала ионизации атома, эВ, приведены также предельные значения для серий оптических переходов, $см^{-1}$, отсчитанные от уровня основного состояния атома. Кроме того, часть данных была получена методами измерения порога фотоионизации, фотоэлектронной спектроскопии и лазерной спектроскопии ридберговских состояний атомов, а также расчетом (водород и его изотопы). В отдельной графе табл. 19.1 указаны конфигурация валентной электроиной оболочки и электронный терм основного состояния атома. Основная информация о потенциалах ионизации атомов представлена в [2—6].

В табл. 19.2 собраны данные о потенциале ионизации легких и средних атомных ионов, характеризующие все ступени ионизации ионов с зарядом ядра $Z \leqslant 36$ и представляющие интерес для физики высокотемпературной плазмы. Большая часть данных для низких степеней ионизации ионов была получена на основе обработки наблюдаемых спектров оптических переходов при высоких уровнях возбуждения частиц, тогда как в случае многократной ионизации использовались различные приемы экстраполяции потенциалов вдоль изоэлектроиных серий [2,5,6]. В табл. 19.3 приведены значения потенциала ионизации одно-, двух- и трехзарядных атомных ионов с $37 \leqslant Z \leqslant 92$, найденные в основном исходя из пределов схождения линий в атомных спектрах [2,3,5,6]. Погрешности в определении искомых значений потенциалов ионизации атомных частиц в табл. 19.1—19.3 были учтены нами при округлении значащих цифр в пределах ± 1 для последней приведенной цифры.

Информация о потенциале ионизации молекул включена в табл. 19.4. В этом случае минимальная энергия отвечает переходу между нулевыми колебательными уровнями основных электронных состояний молекулы и молекулярного иона и может быть названа адиабатическим потенциалом ионизации молекулы. Основными методами экспериментального определения потенциалов ионизации молекул служат методы электронного удара, фотоионизации и спектроскопического определения предела ридберговских серий в полосатых спектрах молекул. Чтобы дать представление о точности измерения значений *IP* для молекул, мы сгруппировали числовые данные по четырем классам точности: *A* — погрешность $\leqslant 1\%$; *B* — $\leqslant 3\%$; *C* — $\leqslant 10\%$ и, наконец, *D* — $\leqslant 30\%$, в соответствии с оценкой использованного метода их получения. Представленные в табл. 19.4 данные основаны на материале монографий [7,8] и многочисленных журнальных публикациях последнего десятилетия.

Таблица 19.1. **Потенциал ионизации атомов**

Атомный номер Z	Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм)	Оптический предел, $см^{-1}$; потенциал ионизации, эВ	Атомный номер Z	Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм)	Оптический предел, $см^{-1}$; потенциал ионизации, эВ
1	H $(1s—^2S_{1/2})$	109678,774 13,5985	27	Co $(3d^74s^2—^4F_{9/2})$	63 400 7,86
	D $(1s—^2S_{1/2})$	109708,671 13,6022	28	Ni $(3d^84s^2—^3F_4)$	61 600 7,637
	T $(1s—^2S_{1/2})$	109718,546 13,6035	29	Cu $(4s—^2S_{1/2})$	62317,4 7,7264
2	^{4}He $(1s^2—^1S_0)$	198310,77 24,5876	30	Zn $(4s^2—^1S_0)$	75769,3 9,3943
	^{3}He $(1s^2—^1S_0)$	198300,3 24,5863	31	Ga $(4p—^2P^0_{1/2})$	48387,63 5,99930
3	Li $(2s—^2S_{1/2})$	43487,15 5,3918	32	Ge $(4p^2—^3P_0)$	63713,2 7,8995
4	Be $(2s^2—^1S_0)$	75192,6 9,32270	33	As $(4p^3—^4S^0_{3/2})$	78 950 9,789
5	B $(2p—^2P^0_{1/2})$	66928,1 8,2981	34	Se $(4p^4—^3P_2)$	78658,2 9,752
6	C $(2p^2—^3P_0)$	90820,4 11,260	35	Br $(4p^5—^2P^0_{3/2})$	95284,8 11,814
7	N $(2p^3—^4S^0_{3/2})$	117225,7 14,53414	36	Kr $(4p^6—^1S_0)$	112914,5 13,9997
8	O $(2p^4—^3P_2)$	109837,0 13,618	37	Rb $(5s—^2S_{1/2})$	33690,88 4,17717
9	F $(2p^5—^2P^0_{3/2})$	140524,5 17,423	38	Sr $(5s^2—^1S_0)$	45932,1 5,69490
10	Ne $(2p^6—^1S_0)$	173929,7 21,565	39	Y $(4d5s^2—^2D_{3/2})$	50 144 6,217
11	Na $(3s—^2S_{1/2})$	41449,4 5,13907	40	Zr $(4d^25s^2—^3F_2)$	53 506 6,634
12	Mg $(3s^2—^1S_0)$	61671,0 7,6463	41	Nb $(4d^45s—^6D_{1/2})$	54 514 6,759
13	Al $(3p—^2P^0_{1/2})$	48278,42 5,9858	42	Mo $(4d^55s—^7S_3)$	57 204 7,0924
14	Si $(3p^2—^3P_0)$	65747,8 8,1517	43	Tc $(4d^55s^2—^6S_{5/2})$	58 700 7,28
15	P $(3p^3—^4S^0_{3/2})$	84580,8 10,4868	44	Ru $(4d^75s—^5F_5)$	59 410 7,366
16	S $(3p^4—^3P_2)$	83559,3 10,36004	45	Rh $(4d^85s—^4F_{9/2})$	60 200 7,46
17	Cl $(3p^5—^2P^0_{3/2})$	104 591 12,968	46	Pd $(4d^{10}—^1S_0)$	67 236 8,336
18	Ar $(3p^6—^1S_0)$	127109,8 15,760	47	Ag $(5s—^2S_{1/2})$	61106,6 7,5763
19	K $(4s—^2S_{1/2})$	35009,81 4,34070	48	Cd $(5s^2—^1S_0)$	72540,1 8,9939
20	Ca $(4s^2—^1S_0)$	49306,0 6,1132	49	In $(5s^25p—^2P^0_{1/2})$	46670,11 5,7864
21	Sc $(3d4s^2—^2D_{3/2})$	52 922 6,5615	50	Sn $(5p^2—^3P_0)$	59232,7 7,3440
22	Ti $(3d^24s^2—^3F_2)$	55 000 6,82	51	Sb $(5p^3—^4S^0_{3/2})$	69431,4 8,60840
23	V $(3d^34s^2—^4F_{3/2})$	54 360 6,74	52	Te $(5p^4—^3P_2)$	72 670 9,010
24	Cr $(3d^54s—^7S_3)$	54 570 6,766	53	I $(5p^5—^2P^0_{3/2})$	84295,0 10,451
25	Mn $(3d^54s^2—^6S_{5/2})$	59959,4 7,43402	54	Xe $(5p^6—^1S_0)$	97833,8 12,1299
26	Fe $(3d^64s^2—^5D_4)$	63 740 7,9024	55	Cs $(6s—^2S_{1/2})$	31406,47 3,89391

Атомный номер Z	Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм)	Оптический предел, $см^{-1}$; потеициал ионизации, эВ	Атомный номер Z	Атом (валентная электронная конфигурация — основной терм)	Оптический предел, $см^{-1}$; потеициал ионизации, эВ
56	Ba $(6s^2—{}^1S_0)$	42034,90 5,21166	80	Hg $(6s^2—{}^1S_0)$	84184,1 10,4376
57	La $(5d6s^2—{}^2D_{3/2})$	44 980 5,577	81	Tl $(6s^26p—{}^2P^0_{1/2})$	49266,7 6,1083
58	Ce $(4f5d6s^2 — {}^1G^0_4)$	44 670 5,539	82	Pb $(6p^3—{}^3P_0)$	59819,6 7,4167
59	Pr $(4f^36s^2—{}^4I^0_{9/2})$	44 100 5,47	83	Bi $(6p^3—{}^4S^0_{3/2})$	58 762 7,2853
60	Nd $(4f^46s^2—{}^5I_4)$	44 560 5,525	84	Po $(6p^4—{}^3P_2)$	67885,3 8,4168
61	Pm $(4f^56s^2—{}^6H^0_{5/2})$	45 000 5,58	85	At $(6p^5—{}^2P^0_{3/2})$	— 9,0
62	Sm $(4f^66s^2—{}^7F_0)$	45 520 5,644	86	Rn $(6p^6—{}^1S_0)$	86 692 10,75
63	Eu $(4f^76s^2—{}^8S^0_{7/2})$	45 735 5,6704	87	Fr $(7s—{}^2S_{1/2})$	32848 4,073
64	Gd $(4f^75d6s^2—{}^9D^0_2)$	49 603 6,150	88	Ra $(7s^2—{}^1S_0)$	42573,4 5,2785
65	Tb $(4f^96s^2—{}^6H^0_{15/2})$	47 300 5,864	89	Ac $(6d7s^2—{}^2D_{3/2})$	42 000 5,2
66	Dy $(4f^{10}6s^2—{}^5I_8)$	47 900 5,939	90	Th $(6d^27s^2—{}^3F_2)$	49 000 6,1
67	Ho $(4f^{11}6s^2—{}^4I^0_{15/2})$	48 570 6,022	91	Pa $(5f^26d7s^2—{}^4K_{11/2})$	47 000 6,0
68	Er $(4f^{12}6s^2—{}^3H_6)$	49 260 6,108	92	U $(5f^36d7s^2—{}^5L^0_6)$	49 960 6,194
69	Tm $(4f^{13}6s^2 — {}^2F^0_{7/2})$	49 880 6,184	93	Np $(5f^46d7s^2 —{}^6L_{11/2})$	50 540 6,266
70	Yb $(4f^{14}6s^2—{}^1S_0)$	50 441 6,254	94	Pu $(5f^67s^2—{}^7F_0)$	49 000 6,06
71	Lu $(4f^{14}5d6s^2—{}^2D_{3/2})$	43762,4 5,426	95	Am $(5f^77s^2—{}^8S^0_{7/2})$	48 300 6,0
72	Hf $(5d^26s^2—{}^3F_2)$	55 600 6,8	96	Cm $(5f^76d7s^2—{}^9D^0_2)$	48 600 6,02
73	Ta $(5d^36s^2—{}^4F_{3/2})$	63 600 7,89	97	Bk $(5f^97s^2—{}^6H^0_{15/2})$	50 200 6,23
74	W $(5d^46s^2—{}^5D_0)$	64 000 7,98	98	Cf $(5f^{10}7s^2—{}^5I_8)$	50 800 6,30
75	Re $(5d^56s^2—{}^6S_{5/2})$	64 000 7,88	99	Es $(5f^{11}7s^2—{}^4I^0_{15/2})$	51 800 6,42
76	Os $(5d^66s^2—{}^5D_4)$	70 450 8,73	100	Fm $(5f^{12}7s^2—{}^3H_6)$	52 000 6,5
77	Ir $(5d^76s^2—{}^4F_{9/2})$	73 000 9,05	101	Md $(5f^{13}7s^2—{}^2F^0_{7/2})$	53 000 6,6
78	Pt $(5d^96s—{}^3D_3)$	72 300 8,96	102	No $(5f^{14}7s^2—{}^1S_0)$	54 000 6,6
79	Au $(5d^{10}6s—{}^2S_{1/2})$	74409,0 9,2256			

Таблица 19.2. Потенциал ионизации атомных ионов ($2 \leqslant Z \leqslant 36$), эВ ($X^{\zeta}$ — спектроскопический символ иона, где $\zeta = Z - N + 1$, N — число электронов в системе)

Атомный номер Z	Элемент X	ζ					
		II	III	IV	V	VI	VII
2	He	54,418					
3	Li	75,641	122,45				
4	Be	18,211	153,90	217,72			
5	B	25,155	37,931	259,38	340,23		
6	C	24,384	47,89	64,49	392,09	490,00	
7	N	29,602	47,45	77,47	97,891	552,07	667 05
8	O	35,118	54,936	77,414	113,90	138,12	739,34
9	F	34,971	62,71	87,14	114,24	157,164	185,19
10	Ne	40,963	63,46	97,12	126,2	157,9	207,28
11	Na	47,287	71,620	98,92	138,40	172,2	208.5
12	Mg	15,035	80,144	109,27	141,27	186,5	224,9
13	Al	18,829	28,448	119,99	153,83	198,48	241,44
14	Si	16,346	33,493	45,142	166,77	205,3	246,5
15	P	19,770	30,2026	51,444	65,026	220,42	263,6
16	S	23,338	34,83	47,305	72,7	88,05	280,9
17	Cl	23,814	39,61	53,47	67,8	97,0	114,20
18	Ar	27,630	40,911	59,81	75,0	91,01	124,32
19	K	31,63	45,81	60,91	82,7	99,4	117,6
20	Ca	11,872	50,913	67,3	84,5	108,8	127,2
21	Sc	12,800	24,757	73,49	91,7	110,7	138,0
22	Ti	13,58	27,49	43,27	99,30	119,53	140,8
23	V	14,66	29,31	46,71	65,28	128,1	150,6
24	Cr	16,50	31,0	49,2	69,5	90,64	160,2
25	Mn	15,640	33,67	51,2	72,4	95	119,3
26	Fe	16,188	30,65	54,8	75	99	124,88
27	Co	17,084	33,5	51,3	79,5	102	129
28	Ni	18,169	35,3	54,9	76	108	133
29	Cu	20,293	36,84	57,4	80	103	139
30	Zn	17,964	39,72	59,57	83	108	134
31	Ga	20,515	30,726	64,2	90	117	147
32	Ge	15,935	34,2	45,715	93,5	120	151
33	As	18,59	28,4	50,1	62,6	128	154
34	Se	21,16	30,82	42,95	68	81,7	155,33
35	Br	21,81	35,90	47,3	59,7	88,6	103
36	Kr	24,360	36,95	52,5	65	78,5	111

Продолжение табл. 19.2

Атомный номер Z	Элемент X	ζ						
		VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
8	O	871,42						
9	F	953,91	1103,13					
10	Ne	239,10	1195,8	1362,21				
11	Na	264,2	299,87	1465,1	1648,71			
12	Mg	266,0	328,2	367,5	1761,8	1962,68		
13	Al	284,60	330,1	399,4	442,0	2086,0	2304,2	
14	Si	303,5	351,1	401,4	476,4	523,4	2437,7	2673,2
15	P	309,6	372,1	424,4	479,5	560,8	611,7	2816,9
16	S	328,2	379,1	447,1	504,8	564,7	651,6	707,2
17	Cl	348,9	400,1	455,6	529,3	592,0	656,7	749,8
18	Ar	143,46	422,4	478,7	539,0	618,3	686,1	755,7
19	K	154,7	175,82	504	564,7	629,4	714,6	786,6
20	Ca	147,2	188,3	211,28	591,9	657,2	726,6	817,6
21	Sc	158,1	180,0	225,1	249,84	687,4	756,7	830,8
22	Ti	170,4	192,1	215,92	265	291,50	787,8	863,1
23	V	173,4	205,8	230,5	256	308	336,3	896,0
24	Cr	184,7	209,3	244,4	271	298	354,8	384,2
25	Mn	194,5	221,8	248,3	286,0	314,4	343,6	403,0
26	Fe	151,06	234	262,1	290	331	361	392

Атомный номер Z	Элемент X	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
27	Co	158	186,1	275	305	336	379	411
28	Ni	162	193	225	321	352	384	430
29	Cu	166	199	232	266	369	401	435
30	Zn	174	203	238	274	311	420	454
31	Ga	179	214	248	284	321	358	475
32	Ge	183	217	255	291	330	369	409
33	As	187	222	259	300	338	379	421
34	Se	191	227	264	304	347	388	431
35	Br	192,8	232	270	310	352	398	441
36	Kr	125,94	230,9	275	316	358	403	451

Атомный номер Z	Элемент X	XV	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI
15	P	3069,87						
16	S	3223,9	3494,2					
17	Cl	809,4	3658,4	3946,3				
18	Ar	854,8	918,0	4120,7	4426,2			
19	K	861,1	968	1033,4	4610,9	4934,1		
20	Ca	894,5	974	1087	1157	5128,9	5469,9	
21	Sc	927,5	1009	1094	1213	1288,0	5674,9	6033,8
22	Ti	941,9	1044	1131	1221	1346	1426	6249,1
23	V	976	1060	1168	1260	1355	1486	1571
24	Cr	1011	1097	1185	1299	1396	1496	1634
25	Mn	435,6	1133	1244	1317	1437	1539	1644
26	Fe	457	489,3	1262	1360	1470	1582	1690
27	Co	444	512,0	546,6	1397	1486	1603	1735
28	Ni	464	499	571,3	607,0	1541	1648	1756
29	Cu	484	520	557	633	671	1690	1793
30	Zn	490	542	579	619	698	737	1846
31	Ga	510	546	596	637	677	765	807
32	Ge	533	568	607	658	701	744	836
33	As	462	594	630	670	724	769	813
34	Se	475	519	657	695	736	793	839
35	Br	486	533	579	724	762	806	864
36	Kr	497	545	593	642	794	833	878

Атомный номер Z	Элемент X	XXII	XXIII	XXIV	XXV	XXVI	XXVII	XXVIII
22	Ti	6625,8						
23	V	6851,3	7246,1					
24	Cr	1721	7482	7894,8				
25	Mn	1788	1880	8141	8571,9			
26	Fe	1800	1960	2046	8828	9277,7		
27	Co	1846	1962	2119	2219	9544	10012,1	
28	Ni	1894	2011	2131	2295	2399	10 290	10 775
29	Cu	1905	2045	2173	2298	2460	2585	11 062
30	Zn	1953	2070	2216	2350	2479	2647	2780
31	Ga	2010	2120	2242	2393	2533	2668	2840
32	Ge	880	2180	2294	2421	2577	2723	2863
33	As	910	957	2357	2474	2606	2768	2920
34	Se	886	987	1036,3	2542	2661	2798	2965
35	Br	913	961	1068	1119	2733	2855	2997
36	Kr	939	989	1039	1151	1205	2931	3056

Продолжение табл. 19.2

Атомный номер Z	Элемент X	XXIX	XXX	XXXI	XXXII	XXXIII	XXXIV	XXXV	XXXVI
29	Cu	11 568							
30	Zn	11 865	12 389						
31	Ga	2982	12 696	13 239					
32	Ge	3041	3192	13 550	14 119				
33	As	3065	3248	3409	14 440	15 029			
34	Se	3123	3274	3463	3633	15 370	15 968		
35	Br	3170	3334	3490	3684	3865	16 315	16 937	
36	Kr	3203	3381	3551	3712	3912	4105	17 290	17 936

Таблица 19.3. **Потенциал ионизации одно-, двух- и трехзарядных тяжелых атомных ионов ($37 \leqslant Z \leqslant 92$), эВ**
(X_z^z — спектроскопический символ иона)

Продолжение табл. 19.3

Атомный номер Z	Элемент X	ζ = II	ζ = III	ζ = IV
37	Rb	27,290	39,2	52,2
38	Sr	11,030	42,88	56,28
39	Y	12,24	20,525	60,61
40	Zr	13,13	23,1	34,419
41	Nb	14,32	25,0	37,7
42	Mo	16,16	27,2	46,4
43	Tc	15,26	29,5	—
44	Ru	16,76	28,5	—
45	Rh	18,08	31,1	—
46	Pd	19,43	32,9	—
47	Ag	21,49	34,8	—
48	Cd	16,908	37,47	—
49	In	18,87	28,0	57,0
50	Sn	14,632	30,50	40,74
51	Sb	16,53	25,32	44,16
52	Te	18,6	27,96	37,42
53	I	19,131	33,0	—
54	Xe	20,98	31,0	45
55	Cs	23,1575	33,4	46
56	Ba	10,004	35,8	47
57	La	11,1	19,18	49,9
58	Ce	10,8	20,20	36,76
59	Pr	10,6	21,62	38,98
60	Nd	10,7	22,1	40,4
61	Pm	10,9	22,3	41,0
62	Sm	11,1	23,4	41,4
63	Eu	11,24	24,9	42,7
64	Gd	12,1	20,6	44,0
65	Tb	11,5	21,9	39,4
66	Dy	11,7	22,8	41,4
67	Ho	11,8	22,8	42,5
68	Er	11,9	22,7	42,7
69	Tm	12,1	23,7	42,7
70	Yb	12,18	25,05	43,6
71	Lu	13,9	20,96	45,25
72	Hf	14,9	23,3	33,4
78	Pt	18,56	—	—
79	Au	20,5	34	43
80	Hg	18,76	34,2	46
81	Tl	20,43	29,85	—
82	Pb	15,033	31,94	42,33
83	Bi	16,70	25,56	45,3
88	Ra	10,15	—	—
89	Ac	11,75	20	—
90	Th	11,9	18,3	28,7
92	U	11,9	20	37

Таблица 19.4. **Потенциал ионизации молекул *IP***

Продолжение табл. 19.4

Молекула	*IP*, эВ	Молекула	*IP*, эВ
1. Двухатомные молекулы			
AgF	11,4(*B*)	BC	10,5 (*C*)
AlCl	9,4 (*C*)	BF	11,1 (*A*)
AlF	9,8 (*C*)	BH	9,8 (*B*)
AlO	9,5 (*C*)	BO	13,5 (*C*)
AlS	9,5 (*C*)	BSi	7,8 (*C*)
AlTe	9,0 (*C*)	BaCl	5,0 (*B*)
Ar_2	14,5 (*A*)	BaF	4,9 (*C*)
ArKr	13,4 (*A*)	BaO	6,9 (*C*)
ArXe	12,0 (*A*)	BeF	9,1 (*C*)
As_2	12 (*C*)	BeH	8,2 (*B*)
At_2	8,3 (*C*)	BeO	10,1 (*C*)
AuBr	9,2 (*C*)	Br_2	10,52 (*A*)
AuSi	8,3 (*C*)	BrCl	11,1 (*B*)
BrF	11,8 (*B*)	Cl_2	11,50 (*A*)
BrO	10,3 (*A*)	ClF	12,7 (*B*)
C_2	12,15 (*A*)	ClO	11,0 (*B*)
CF	9,20 (*B*)	CoO	9,0 (*C*)
CH	10,64 (*A*)	CrF	8,4 (*C*)
CN	14,2 (*A*)	CrO	8,4 (*C*)
CO	14,014 *A*)	Cs_2	3,64 (*B*)
CS	11,33 (*A*)	CsBr	7,72 (*A*)
CaF	6,0 (*C*)	CsCl	8,3 (*B*)
CaH	5,9 (*B*)	CsF	8,8 (*B*)
CaCl	6,0 (*B*)	CsI	7,25 (*A*)
CaO	6,5 (*C*)	Cu_2	7,4 (*B*)
CeO	4,9 (*C*)	D_2	15,467(*A*)

Продолжение табл. 19.4

Молекула	*IP*, эВ	Молекула	*IP*, эВ
DBr	11,67 (*A*)	MnF	8,7 (*C*)
DCl	12,76 (*A*)	MoO	8,0 (*C*)
DF	16,06 (*A*)	N_2	15,581 (*A*)
DI	10,39 (*A*)	NF	12,3 (*B*)
DT	15,475 (*A*)	NH	13,1 (*A*)
DyF	6,0 (*C*)	NO	9,264 (*A*)
ErF	6,3 (*C*)	NS	8,9 (*B*)
F_2	15,686 (*A*)	Na_2	4,90 (*A*)
FeO	8,7 (*B*)	NaBr	8,3 (*B*)
GaF	10,6 (*C*)	NaCl	8,93 (*A*)
GaO	9,4 (*C*)	NaI	7,64 (*A*)
GaS	8,9 (*C*)	NaLi	4,9 (*B*)
GaSe	8,8 (*C*)	NaK	4,6 (*C*)
GaTe	8,4 (*C*)	NdO	5,0 (*D*)
Ge_2	7,9 (*C*)	NiCl	11,4 (*B*)
GeBr	7,3 (*C*)	NiO	9,5 (*C*)
GeC	10,3 (*C*)	O_2	12,071 (*A*)
GeCl	7,2 (*C*)	OD	12,9 (*A*)
GeF	7,5 (*C*)	OH	12,9 (*A*)
GeO	11,1 (*B*)	OT	12,9 (*A*)
GeSi	8,2 (*C*)	P_2	10,5 (*A*)
GeTe	10,1 (*C*)	PC	10,5 (*C*)
H_2	15,4259 (*A*)	PH	10,6 (*B*)
HBr	11,67 (*A*)	PO	8,2 (*B*)
HCl	12,75 (*A*)	PbBr	7,8 (*C*)
HD	15,445 (*A*)	PbCl	7,5 (*C*)
HF	16,04 (*A*)	PbF	7,5 (*C*)
HI	10,38 (*A*)	PbO	9,0 (*C*)
HT	15,451 (*A*)	PbS	8,6 (*C*)
He_2	22,22 (*A*)	PbTe	8,2 (*C*)
HfO	7,5 (*B*)	Pd_2	7,7 (*C*)
HoF	6,2 (*C*)	PdO	9,1 (*C*)
I_2	9,3 (*B*)	PdSi	8,4 (*C*)
IBr	9,85 (*A*)	PrO	4,9 (*C*)
ICl	10,08 (*A*)	PtB	10 (*D*)
IF	10,5 (*B*)	PtSi	7,9 (*C*)
InBr	9,1 (*B*)	Rb_2	3,45 (*B*)
InCl	9,5 (*B*)	RbBr	7,7 (*B*)
InF	9,6 (*C*)	RbCl	8,3 (*B*)
InI	8,5 (*B*)	RbI	7,1 (*B*)
InS	7,0 (*C*)	RhO	9,3 (*C*)
InSe	7,1 (*C*)	RuO	8,7 (*C*)
InTe	7,6 (*C*)	S_2	9,356 (*A*)
IrC	9,5 (*D*)	SH	10,4 (*A*)
K_2	4,0 (*B*)	SO	10,29 (*A*)
KCl	8,4 (*B*)	Sb_2	9,0 (*C*)
KI	8,2 (*C*)	Se_2	8,88 (*A*)
KLi	4,7 (*B*)	SeH	9,06 (*A*)
KNa	4,5 (*B*)	Si_2	7,4 (*C*)
Kr_2	12,87 (*A*)	SiC	10,2 (*B*)
LaO	4,9 (*B*)	SiF	7,26 (*A*)
Li_2	5,145 (*A*)	SiO	11,4 (*A*)
LiBr	10,0 (*C*)	SnBr	7,4 (*C*)
LiCl	10,1 (*C*)	SnCl	6,6 (*C*)
LiD	7,7 (*C*)	SnF	7,4 (*C*)
LiF	11,3 (*C*)	SnO	10,5 (*C*)
LiH	7,85 (*B*)	SnS	9,7 (*C*)
LiI	8,6 (*C*)	SnSe	9,7 (*C*)
LiNa	4,9 (*B*)	SnTe	9,1 (*C*)
LiO	8,4 (*B*)	SrCl	5,6 (*B*)
MgCl	7,5 (*B*)	SrF	4,9 (*C*)
MgF	7,8 (*C*)		
Mn_2	7,4 (*C*)		

Продолжение табл. 19.4

Молекула	*IP*, эВ	Молекула	*IP* эВ
SrO	6,1 (*C*)	$SrCl_2$	9,7 (*B*)
T_2	15,487 (*A*)	UO_2	5,5 (*B*)
TaO	6,0 (*C*)	XeF_2	12,42 (*A*)
Te_2	8,29 (*A*)		
TeO	8,7 (*B*)		
Ti_2	6,3 (*C*)		
TiO	6,4 (*C*)		
TiS	7,1 (*C*)		
TlBr	9,14 (*A*)		
TlCl	9,70 (*A*)		
TlF	10,5 (*B*)		
TlI	8,47 (*A*)		
V_2	6,4 (*C*)		
VO	5,0 (*D*)		
WO	9,1 (*D*)		
UC	6,2 (*C*)		
UN	7,0 (*C*)		
UO	5,7 (*B*)		
US	6,3 (*C*)		
Xe_2	11,13 (*A*)		
ZrN	7,9 (*C*)		
ZrO	6,1 (*C*)		

2. Трехатомные молекулы

BH_2	9,8 (*C*)	BBr_3	10,68 (*A*)
$BaCl_2$	9,2 (*B*)	BCl_3	11,73 (*A*)
BaI_2	8,1 (*C*)	BF_3	15,95 (*A*)
BeF_2	14,7 (*C*)	BH_3	11,4 (*C*)
BrCN	11,84 (*A*)	BI_3	9,40 (*A*)
CCl_2	13,2 (*B*)	CH_3	9,840 (*A*)
CF_2	11,8 (*B*)	C_2H_2	11,406 (*A*)
CH_2	10,396 (*A*)	H_2O_2	10,9 (*C*)
CO_2	13,79 (*A*)	HBO_2	12,6 (*B*)
COS	11,18 (*A*)	NH_3	10,15 (*A*)
CS_2	10,07 (*A*)	PF_3	9,71 (*A*)
$CaCl_2$	10,3 (*A*)		
ClCN	12,34 (*A*)		
ClO_2	11,1 (*C*)		
Cs_2O	4,45 (*A*)		
CsOH	7,21 (*B*)		
FCN	13,32 (*A*)		
$GeBr_2$	9,5 (*C*)		
$GeCl_2$	10,4 (*C*)		
GeF_2	11,8 (*B*)		
HCN	13,73 (*A*)		
HO_2	11,53 (*A*)		
H_2O	12,614 (*A*)		
H_2S	10,47 (*A*)		
ICN	10,87 (*A*)		
Li_2O	6,8 (*B*)		
NF_2	12,11 (*A*)		
NH_2	10,15 (*A*)		
NO_2	9,78 (*A*)		
N_2O	12,89 (*A*)		
O_3	12,52 (*A*)		
SO_2	12,34 (*A*)		
SiC_2	10,2 (*B*)		
SiF_2	11,0 (*C*)		
SiO_2	11,7 (*C*)		
$SnCl_2$	10,2 (*C*)		

4. Пятиатомные молекулы

CBr_4	11,0 (*B*)
CCl_4	11,47 (*A*)
CF_2Cl_2	12,31 (*A*)
$CFCl_3$	11,77 (*A*)
CH_4	12,98 (*A*)
CH_2Cl_2	11,35 (*A*)
CH_3Br	10,53 (*A*)
CH_3I	9,538 (*A*)
SiH_4	11,4 (*C*)
$SnBr_4$	11,0 (*A*)
$SnCl_4$	12,10 (*A*)
XeF_4	12,65 (*A*)

5. Шестиатомные молекулы

C_2Cl_4	9,34 (*A*)
C_2F_4	10,12 (*A*)
C_2H_4	10,51 (*A*)
CH_3OH	10,85 (*A*)
N_2F_4	12,0 (*A*)
N_2H_4	8,74 (*A*)

6. Более сложные молекулы

SF_6	15,7 (*A*)
UF_6	14,14 (*A*)
XeF_6	12,19 (*A*)
B_2H_6	11,41 (*A*)
C_2H_6	11,50 (*A*)
C_2H_5Br	10,29 (*A*)
C_2H_5OH	10,47 (*A*)

Таблица 19.5 Энергия связи электронов из внутренних оболочек свободных атомов, эВ

I. $Z = 3 \div 18$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона					Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона				
		K	L_1	L_2	L_3	M_1			K	L_1	L_2	L_3	M_1
		$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$			$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$
3	Li	64,40					11	Na	1079	70,9	38,46	38,0	
4	Be	123,6					12	Mg	1311,3	96,5	57,6	57,6	
5	B	201	12,93				13	Al	1567	126	81	80	10,62
6	C	296	16,59				14	Si	1844	154	104	104	13,46
7	N	403	20,33				15	P	2148	191	135	134	16,15
8	O	538	28,48				16	S	2476	232	170	168	20,20
9	F	694	37,86				17	Cl	2829	277	208	206	24,59
10	Ne	870,27	48,47				18	Ar	3206	326,37	250,6	248,6	29,24

II. $Z = 19 \div 36$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона									
		K	L_1	L_2	L_3	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	N_1
		$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{5/2}$	$4s_{1/2}$
19	K	3614	384	303,3	300,7	37	24,82	24,49			
20	Ca	4048	447	360	356	48	34,7	34,3			
21	Sc	4494	503	408	404	56	33	33			
22	Ti	4970	567	465	459	64	39	38			
23	V	5470	633	525	518	72	44	43			
24	Cr	5995	702	589	580	80	49	48			
25	Mn	6544	755	656	652	89	55	53			
26	Fe	7117	851	726	713	98	61	59			
27	Co	7715	931	800	785	107	68	66			
28	Ni	8338	1015	877	860	117	75	73			
29	Cu	8986	1103	958	938	127	82	80			
30	Zn	9663	1198	1052	1029	141	98,7	96,1			
31	Ga	10371	1302	1146	1119	162	111	107	21	20	11,87
32	Ge	11107	1413	1251	1220	184	130	125	33	32	14,28
33	As	11871	1531	1362	1327	208	151	145	46	45	18,96
34	Se	12662	1656	1479	1439	234	173	166	61	60	22,19
35	Br	13481	1787	1602	1556	262	197	189	77	76	23,80
36	Kr	14327	1923	1731	1678	293	222	214,6	95,0	93,8	27,51

III. $Z = 37 \div 54$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона														
		K	L_1	L_2	L_3	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	O_1
		$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{5/2}$	$4s_{1/2}$	$4p_{1/2}$	$4p_{3/2}$	$4d_{3/2}$	$4d_{5/2}$	$5s_{1/2}$
37	Rb	15203	2068	1867	1807	325	254,3	245,4	117,4	116	114	21,77	20,71			
38	Sr	16108	2219	2010	1943	361	288	278	144	142	40	29,2	28,2			
39	Y	17041	2375	2158	2083	397	315	304	163	161	48	30	29			
40	Zr	18002	2536	2311	2227	434	348	335	187	185	56	35	33			
41	Nb	18990	2702	2469	2375	472	382	367	212	209	62	40	38			
42	Mo	20006	2872	2632	2527	511	416	399	237	234	68	45	42			
43	Tc	21050	3048	2800	2683	551	451	432	263	259	74	49	45			
44	Ru	22123	3230	2973	2844	592	488	466	290	286	81	53	49			

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона														
		K	L_1	L_2	L_3	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	O_1
		$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{5/2}$	$4s_{1/2}$	$4p_{1/2}$	$4p_{3/2}$	$4d_{3/2}$	$4d_{5/2}$	$5s_{1/2}$
45	Rh	23225	3418	3152	3010	634	526	501	318	313	87	58	53			
46	Pd	24357	3611	3337	3180	677	565	537	347	342	93	63	57			
47	Ag	25520	3812	3530	3357	724	608	577	379	376	101	69	63			
48	Cd	26715	4022	3732	3542	775	659	625	419	412	112	78	71	18,28	17,58	
49	In	27944	4242	3943	3735	830	707	669	455	447	126	90	82	21	20	11,03
50	Sn	29204	4469	4160	3933	888	761	719	497	489	141	102	93	29	28	13,10
51	Sb	30496	4703	4385	4137	949	817	771	542	533	157	114	104	38	37	16,86
52	Te	31820	4945	4618	4347	1012	876	825	589	578	174	127	117	48	46	17,84
53	I	33176	5195	4858	4563	1078	937	881	638	626	193	141	131	58	56	20,61
54	Xe	34561	5453	5107	4787	1149	1002	941	689	677	213,3	157	145,5	69,5	67,5	23,40

IV. $Z = 55 \div 83$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона																
		K	L_1	L_2	L_3	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	O_1	O_2	O_3
		$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{5/2}$	$4s_{1/2}$	$4p_{1/2}$	$4p_{3/2}$	$4d_{3/2}$	$4d_{5/2}$	$5s_{1/2}$	$5p_{1/2}$	$5p_{3/2}$
55	Cs	35987	5717	5362	5014	1220	1068	1005	746	732	233	174	164	81	79	25	19,07	17,21
56	Ba	37442	5991	5626	5249	1293	1138	1063	797	788	254	193	181	101	98,4	31	24,8	22,8
57	La	38928	6269	5894	5486	1365	1207	1124	851	834	273	210	196	105	103	36	22	19
58	Ce	40446	6552	6167	5726	1437	1275	1184	903	885	291	225	209	114	111	39	25	22
59	Pr	41995	6839	6444	5968	1509	1342	1244	954	934	307	238	220	121	117	41	27	24
60	Nd	43575	7132	6727	6213	1580	1408	1303	1005	983	321	250	230	126	122	42	28	25
61	Pm	45188	7432	7017	6464	1653	1476	1362	1057	1032	335	261	240	131	127	43	28	25
62	Sm	46837	7740	7315	6720	1728	1546	1422	1110	1083	349	273	251	137	132	44	29	25
63	Eu	48522	8056	7621	6981	1805	1618	1484	1164	1135	364	286	262	143	137	45	30	26
64	Gd	50243	8380	7935	7247	1884	1692	1547	1220	1189	380	300	273	150	143	46	31	27
65	Tb	51999	8711	8256	7518	1965	1768	1612	1277	1243	398	315	285	157	150	48	32	28
66	Dy	53792	9050	8585	7794	2048	1846	1678	1335	1298	416	331	297	164	157	50	33	28
67	Ho	55622	9398	8922	8075	2133	1926	1746	1395	1354	434	348	310	172	164	52	34	29
68	Er	57489	9754	9267	8361	2220	2008	1815	1456	1412	452	365	323	181	172	54	35	30
69	Tm	59393	10118	9620	8651	2309	2092	1885	1518	1471	471	382	336	190	181	56	36	30
70	Yb	61335	10490	9981	8946	2401	2178	1956	1580	1531	490	399	349	200	190	58	37	31
71	Lu	63320	10876	10355	9250	2499	2270	2032	1647	1596	514	420	366	213	202	62	39	32
72	Hf	65350	11275	10742	9564	2604	2369	2113	1720	1665	542	444	386	229	217	68	43	35
73	Ta	67419	11684	11139	9884	2712	2472	2197	1796	1737	570	469	407	245	232	74	47	38
74	W	69529	12103	11546	10209	2823	2577	2283	1874	1811	599	495	428	261	248	80	51	41
75	Re	71681	12532	11963	10540	2937	2686	2371	1953	1887	629	522	450	278	264	86	56	45
76	Os	73876	12972	12390	10876	3054	2797	2461	2035	1964	660	551	473	295	280	92	61	49
77	Ir	76115	13422	12828	11219	3175	2912	2554	2119	2044	693	581	497	314	298	99	66	53
78	Pt	78399	13883	13277	11567	3300	3030	2649	2206	2126	727	612	522	335	318	106	71	57
79	Au	80729	14356	13738	11923	3430	3153	2748	2295	2210	764	645	548	357	339	114	76	61
80	Hg	83108	14845	14214	12288	3567	3283	2852	2390	2300	809	686	584	385	366	134	90	72
81	Tl	85536	15350	14704	12662	3710	3420	2961	2490	2394	852	726	615	411	391	139	98	79
82	Pb	88011	15867	15206	13041	3857	3560	3072	2592	2490	899	769	651	441	419	153	111	90
83	Bi	90534	16396	15719	13426	4007	3704	3185	2696	2588	946	813	687	472	448	167	125	101

V. $Z = 84 \div 94$

Атомный номер Z	Атом	Электронные подоболочки, главное квантовое число и угловой момент вылетающего электрона																				
		K	L_1	L_2	L_3	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	O_1	O_2	O_3	O_4	O_5
		$1s_{1/2}$	$2s_{1/2}$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s_{1/2}$	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{5/2}$	$4s_{1/2}$	$4p_{1/2}$	$4p_{3/2}$	$4d_{3/2}$	$4d_{5/2}$	$4f_{5/2}$	$4f_{7/2}$	$5s_{1/2}$	$5p_{1/2}$	$5p_{3/2}$	$5d_{3/2}$	$5d_{5/2}$
84	Po	93105	16933	16242	13815	4160	3850	3300	2800	2685	992	855	720	500	475	190	184	183	137	108	39	35
85	At	95730	17485	16780	14213	4315	4000	3415	2905	2785	1043	902	760	533	504	212	205	198	150	118	45	42
86	Rn	98400	18053	17335	14615	4480	4155	3535	3015	2890	1095	950	795	565	535	235	230	215	165	129	53	48
87	Fr	101135	18640	17905	15030	4650	4320	3660	3135	3000	1155	1005	840	604	572	265	255	235	184	144	65	60
88	Ra	103920	19240	18490	15450	4825	4490	3790	3253	3110	1213	1062	885	640	608	293	285	260	205	158	75	70
89	Ac	106760	19850	19090	15875	5005	4660	3920	3375	3225	1275	1118	930	680	645	320	312	280	222	173	90	82
90	Th	109655	20475	19700	16305	5187	4835	4050	3495	3337	1335	1173	972	718	682	350	340	295	238	185	100	92
91	Pa	112600	21115	20320	16735	5372	5007	4180	3610	3445	1390	1228	1010	748	713	375	365	313	250	190	102	95
92	U	115605	21763	20953	17170	5553	5185	4308	3730	3555	1445	1277	1050	785	743	395	385	328	265	200	110	100
93	Np	118675	22432	21605	17615	5745	5370	4440	3855	3670	1505	1332	1090	820	775	420	410	345	288	210	115	105
94	Pu	121795	23103	22270	18062	5938	5545	4560	3975	3780	1565	1383	1125	852	805	442	430	355	298	220	120	110

19.3. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВНУТРЕННИХ ОБОЛОЧКАХ АТОМОВ

В табл. 19.5 представлены значения энергии связи электронов, заполняющих внутренние оболочки атомов,— минимальной энергии, затрачиваемой на вырывание электронов из замкнутых внутренних оболочек. После отрыва электрона от атома образующийся ион может оказаться в различных состояниях. Взаимодействие между валентной электронной оболочкой и внутренней оболочкой с вакансией приводит к относительно небольшому расщеплению энергии этих состояний. Приведенные в табл. 19.5 значения энергии связи электронов соответствуют образованию наинизшего по энергии состояния иона.

Энергии связи электронов соответствуют свободным атомам, т. е. отнесены к нулевому потенциалу вакуума. В случае проводящих твердых тел измеряемые значения энергии связи электронов в атомах относятся к уровню Ферми соответствующего проводника. Для пересчета искомой энергии к вакуумному уровню в этом случае требуется к измеренному значению прибавить работу выхода элемента, которая для металлов изменяется в диапазоне от 1,93 эВ (цезий) до 5,36 эВ (платина) и составляет в среднем около 4 эВ.

Наиболее точный метод измерения энергии связи электронов во внутренних оболочках атомов (погрешность $\leqslant \pm 0{,}1$ эВ) основан на рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии газообразных веществ. Кроме того, искомые энергии определяют методами фотопоглощения, рентгеновской эмиссии, оже-спектроскопии и т. д. [9].

В верхней графе табл. 19.5 указаны символы электронных подоболочек атомов, отвечающие разным главным квантовым числам электрона, его орбитальному и полному моментам. При отборе материала для этой таблицы были использованы работы [6,9—16]. Погрешность определения искомых значений энергии учитывалась нами при округлении значащих цифр в пределах $\pm 1 \div \pm 3$ для последней приведенной цифры.

19.4. ЭНЕРГИЯ СРОДСТВА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ К ЭЛЕКТРОНУ

Энергией сродства EA к электрону называют энергию связи электрона в соответствующем отрицательном ионе — минимальную энергию, затрачиваемую на отрыв электрона от атома или молекулы. В случае молекулярных частиц под величиной EA следует понимать энергию, отвечающую переходу между основными колебательными состояниями частиц.

В табл. 19.6 представлены значения энергии сродства атомов к электрону. Наиболее точные современные методы измерения этой величины основаны на анализе порогового поведения сечения лазерного фотоотрыва и лазерной фотоэлектронной спектроскопии [17—20]. В отдельных графах табл. 19.6 приведены электронная конфигурация валентной оболочки иона и соответствующий терм отрицательного иона.

В табл. 19.7 собраны значения EA двухатомных и более сложных молекулярных частиц. Среди наиболее надежных методов определения этой величины отметим фотоэлектронную спектроскопию, фотоотрыв, перезарядку ионов и столкновительную ионизацию [17, 18, 21, 22].

Для того чтобы дать представление о точности измерения величины EA для атомов и молекул, мы распределили числовые значения по четырем классам точности: A — погрешность $\leqslant 1\%$; B — $\leqslant 3\%$; C — $\leqslant 10\%$; D — $\leqslant 30\%$, в соответствии с оценкой использованного метода их получения.

19.5. ЭНЕРГИЯ СРОДСТВА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ К ПРОТОНУ

Энергия сродства к протону (PA) соответствует энергии, выделяющейся при присоединении к нейтральному атому или молекуле протона (H^+), и является основной характеристикой газофазных процессов перехода протона при столкновениях частиц в низкотемпературной плазме. Универсальное определение искомой величины PA основано на рассмотрении гипотетической реакции

$$X + H^+ \rightarrow XH^+;$$

при этом энергия сродства молекулы X к протону равна изменению энтальпии с обратным знаком для написанной реакции, или если воспользоваться понятием теплоты образования ΔH_f° частиц X, H^+ и XH^+, получим

$$PA(X) = \Delta H_{f0}^\circ(X) + \Delta H_{f0}^\circ(H^+) - \Delta H_{f0}^\circ(XH^+);$$

Таблица 19.6. **Энергия сродства атомов к электрону (*EA*)**

Атомный номер Z	Отрицательный ион (электронный терм)	Конфигурация внешней электронной оболочки	*EA*, эВ
1	H^- (^1S)	$1s^2$	0,75421 (*A*)
2	He^- (^4P)	$1s2s2p$	0,077 (*B*)
3	Li^- (^1S)	$1s^22s^2$	0,618 (*A*)
5	B^- (^3P)	$2s^22p^2$	0,28 (*C*)
6	C^- (^4S)	$2s^22p^3$	1,263 (*A*)
	C^- (^2D)	$2s^22p^3$	0,035 (*B*)
8	O^- (^2P)	$2s^22p^5$	1,46112 (*A*)
9	F^- (^1S)	$2s^22p^6$	3,40 (*A*)
11	Na^- (^1S)	$3s^2$	0,5479 (*A*)
13	Al^-($^3P_0$)	$3p^2$	0,44 (*B*)
	Al^- ($^1D_2$)	$3p^2$	0,33 (*B*)
14	Si^- (^4S)	$3p^3$	1,39 (*A*)
	Si^- (^2D)	$3p^3$	0,52 (*B*)
	Si^- (^2P)	$3p^3$	0,03 (*B*)
15	P^- (^3P)	$3p^4$	0,746 (*A*)
16	S^- (^2P)	$3p^5$	2,07712 (*A*)
17	Cl^- (^1S)	$3p^6$	3,62 (*A*)
19	K^- (^1S)	$4s^2$	0,5015 (*A*)
21	Sc^- (^1D)	$3d4s^24p$	0,19 (*C*)
	Sc^- (^3D)	$3d4s^24p$	0,04 (*D*)
22	Ti^- (^4F)	$3d^34s^2$	0,08 (*D*)
23	V^- (^5D)	$3d^44s^2$	0,53 (*C*)
24	Cr^- (^6S)	$3d^54s^2$	0,67 (*B*)
26	Fe^- (^4F)	$3d^74s^2$	0,15 (*B*)
27	Co^- (^3F)	$3d^84s^2$	0,66 (*B*)
28	Ni^- (^2D)	$3d^94s^2$	1,16 (*A*)
29	Cu^- (^1S)	$3d^{10}4s^2$	1,23 (*A*)
31	Ga^- (^3P)	$4p^2$	0,3 (*D*)
32	Ge^- (^4S)	$4p^3$	1,23 (*A*)
33	As^- (^3P)	$4p^4$	0,80 (*C*)
34	Se^- (^2P)	$4p^5$	2,021 (*A*)
35	Br^- (^1S)	$4p^6$	3,37 (*A*)
37	Rb^- (^1S)	$5s^2$	0,4859 (*A*)
39	Y^- (^1D)	$4d5s^25p$	0,31 (*C*)
	Y^- (^3D)	$4d5s^25p$	0,16 (*D*)
40	Zr^- (^4F)	$4d^35s^2$	0,43 (*B*)
41	Nb^- (^5D)	$4d^45s^2$	0,89 (*B*)
42	Mo^- (^6S)	$4d^55s^2$	0,75 (*B*)
43	Tc^- (^5D)	$4d^65s^2$	0,6 (*D*)
44	Ru^- (^4F)	$4d^75s^2$	1,1 (*D*)
45	Rh^-(^3F)	$4d^85s^2$	1,14 (*A*)
46	Pd^- (^2D)	$4d^95s^2$	0,56 (*B*)
47	Ag^- (^1S)	$4d^{10}5s^2$	1,30 (*A*)
49	In^- (^3P)	$5p^2$	0,3 (*D*)
50	Sn^- (^4S)	$5p^3$	1,11 (*A*)
51	Sb^- (^3P)	$5p^4$	1,1 (*C*)
52	Te^- (^2P)	$5p^5$	1,971 (*A*)
53	I^- (^1S)	$5p^6$	3,059 (*A*)
55	Cs^- (^1S)	$6s^2$	0,4716 (*A*)
57	La^- (^3F)	$5d^26s^2$	0,5 (*D*)
73	Ta^- (^5D)	$5d^46s^2$	0,32 (*C*)
74	W^- (^6S)	$5d^56s^2$	0,82 (*A*)
75	Re^- (^5D)	$5d^66s^2$	0,15 (*D*)
76	Os^- (^4F)	$5d^76s^2$	1,4 (*D*)
77	Ir^- (^3F)	$5d^86s^2$	1,57 (*A*)
78	Pt^- (^2D)	$5d^96s^2$	2,13 (*A*)
79	Au^- (^1S)	$5d^{10}6s^2$	2,3086 (*A*)
81	Tl^- (^3P)	$6p^2$	0,3 (*D*)
82	Pb^- (^4S)	$6p^3$	0,37 (*B*)
83	Bi^- (^3P)	$6p^4$	0,95 (*B*)
84	Po^- (^2P)	$6p^5$	1,9 (*D*)
85	At^- (^1S)	$6p^6$	2,9 (*D*)

Таблица 19.7. **Энергия сродства молекул к электрону (*EA*)**

Молекула	*EA*, эВ	Молекула	*EA*, эВ
Двухатомные молекулы		Трехатомные молекулы	
Al_2	2,42 (*C*)	AlF_2	2,3 (*C*)
AlO	3,6 (*C*)	AlO_2	4,1 (*C*)
AsBr	1,3 (*C*)	$AsBr_2$	3,5 (*C*)
AsCl	1,3 (*C*)	$AsCl_2$	2,2 (*C*)
AsF	1,3 (*C*)	AsF_2	0,8 (*D*)
AsH	1,0 (*D*)	AsH_2	1,27 (*B*)
BO	3,0 (*C*)	BF_2	2,2 (*C*)
Be_2	0,3 (*D*)	BO_2	4,0 (*C*)
BeH	0,7 (*D*)	C_3	2,5 (*C*)
BeO	1,8 (*C*)	CF_2	2,1 (*D*)
Br_2	2,6 (*C*)	C_2H	3,73 (*B*)
C_2	3,39 (*B*)	CH_2	0,65 (*A*)
CBr	1,7 (*C*)	CNS	2,0 (*C*)
CF	3,3 (*C*)	COS	0,5 (*D*)
CH	1,24 (*A*)	CS_2	0,85 (*D*)
CN	3,82 (*A*)	CoH_2	1,45 (*A*)
CS	0,21 (*C*)	FCN	4,0 (*D*)
CaH	0,93 (*C*)	FeH_2	1,05 (*B*)
Cl_2	2,44 (*B*)	GeF_2	1,3 (*D*)
ClO	2,0 (*D*)	HNO	0,34 (*C*)
CsCl	0,45 (*B*)	LiCN	0,74 (*D*)
F_2	2,96 (*B*)	LiNC	0,62 (*D*)
FeO	1,49 (*B*)	LiOH	0,22 (*D*)
I_2	2,51 (*B*)	MnH_2	0,44 (*C*)
IBr	2,6 (*C*)	NCO	2,6 (*D*)
ICl	2,8 (*C*)	NH_2	0,757 (*B*)
KBr	0,64 (*B*)	NF_2	1,7 (*D*)
KCl	0,58 (*B*)	NO_2	2,42 (*B*)
KI	0,73 (*B*)	N_2O	0,24 (*D*)
Li_2	0,7 (*D*)	NiH_2	1,93 (*A*)
LiCl	0,59 (*B*)	O_3	2,103 (*A*)
LiF	0,44 (*C*)	P_3	0,9 (*D*)
LiH	0,3 (*D*)	PH_2	1,27 (*A*)
LiN	0,4 (*D*)	PF_2	1,4 (*C*)
MgH	1,05 (*C*)	S_3	2,09 (*B*)
NH	0,3744 (*A*)	SCN	2,2 (*D*)
NO	0,03 (*D*)	SH_2	1,1 (*C*)
NS	1,19 (*A*)	SO_2	1,11 (*A*)
NaBr	0,79 (*B*)	S_2O	1,88 (*A*)
NaCl	0,73 (*B*)	SeCN	2,6 (*C*)
NaF	0,52 (*B*)	SiH_2	1,12 (*B*)
NaI	0,86 (*B*)	SiCN	2,6 (*C*)
NaH	0,32 (*D*)	SiH_2	1,12 (*B*)
O_2	0,440 (*B*)		
OH	1,8277 (*A*)	Четырехатомные молекулы	
OD	1,8255 (*A*)		
P_2	0,59 (*C*)	CCl_3	1,2 (*D*)
PH	1,03 (*A*)	CF_3	1,92 (*C*)
PO	1,09 (*B*)	CH_3	1,07 (*B*)
RbCl	0,54 (*B*)	CO_3	2,82 (*B*)
S_2	1,66 (*B*)	GeF_3	3,0 (*D*)
SF	2,5 (*C*)	FeF_3	3,6 (*C*)
SH	2,31 (*A*)	MnF_3	4,4 (*C*)
SO	1,09 (*C*)	NO_3	3,7 (*B*)
SeH	2,2125 (*A*)	PBr_3	1,6 (*D*)
SeO	1,46 (*B*)	PBr_2Cl	1,6 (*D*)
SiH	1,28 (*A*)	$PBrCl_2$	1,5 (*C*)
TeH	2,10 (*A*)	PCl_3	0,8 (*D*)
ZnH	0,95 (*D*)	$POCl_2$	3,8 (*C*)
		SF_3	2,9 (*C*)
		SO_3	1,7 (*C*)
		SO_2F	2,8 (*C*)

Продолжение табл. 19.7

Молекула	*EA*, эВ	Молекула	*EA*, эВ
SiF_3	2,7 (*C*)	Шестнатомные и более сложные молекулы	
SiH_3	1,4 (*D*)	C_3F_3	4,0 (*D*)
UF_3	1,5 (*D*)	C_3H_3	2,3 (*D*)
Пятиатомные молекулы		MoF_5	3,3 (*C*)
CCl_3F	1,1 (*D*)	PtF_5	6,5 (*C*)
CCl_2F_2	0,4 (*D*)	SF_5	3,7 (*C*)
CD_3O	1,55 (*B*)	UF_5	4,0 (*C*)
C_2F_3	2,0 (*D*)	C_2Cl_5	1,6 (*D*)
CF_3Br	0,9 (*D*)	C_2F_5	2,2 (*C*)
CF_2CO	2,4 (*D*)	C_2H_5	0,89 (*C*)
CF_3I	1,5 (*C*)	C_4H_2N	1,7 (*D*)
CF_3O	1,4 (*D*)	Fe_2F_5	4 (*D*)
CF_3S	1,8 (*D*)	IrF_6	4,3 (*C*)
CH_3Br	0,4 (*D*)	MoF_6	4,2 (*C*)
CH_3O	1,57 (*B*)	OsF_6	4,1 (*D*)
CH_3S	1,6 (*D*)	PtF_6	8,0 (*C*)
CO_4	1,22 (*C*)	ReF_6	3,9 (*D*)
$LiCH_3$	0,24 (*D*)	SF_6	0,55 (*C*)
CeF_4	3,6 (*C*)	SeF_6	3,0 (*C*)
FeF_4	5,4 (*C*)	TeF_6	3,3 (*B*)
HNO_3	0,6 (*D*)	UF_6	5,0 (*B*)
MnF_4	5,3 (*C*)	WF_6	4,3 (*C*)
$OH \cdot H_2O$	1,95 (*C*)	C_3F_5	2,2 (*D*)
$POCl_3$	1,4 (*D*)	C_2H_5O	0,6 (*D*)
PtF_4	5,2 (*C*)	C_2H_5S	1,4 (*D*)
SF_4	2,35 (*B*)	Fe_2F_6	4,4 (*C*)
UF_4	1,7 (*D*)	C_4F_5	1,0 (*D*)
		C_2H_6N	1,0 (*D*)
		C_3F_7	2,2 (*C*)
		C_3H_7	0,6 (*D*)
		C_5H_5	1,79 (*B*)
		C_6Cl_5	2,8 (*C*)
		C_4F_7	3,1 (*D*)
		C_6F_5	2,74 (*C*)
		C_6H_5	2,3 (*C*)
		C_6F_6	0,5 (*D*)

здесь теплота образования отнесена к элементам в их стандартных состояниях.

Основные методы определения *PA* основаны на измерении константы равновесия для реакций с передачей протона путем использования масс-спектрометров высокого давления, ионного циклотронного резонанса или проточной техники исследования послесвечения плазмы и др. [23—25].

В табл. 19.8 включены значения *PA* для атомов, которые соответствуют энергии диссоциации молекулярного иона гидрида из основного колебательного состояния. В табл. 19.9 представлены значения *PA* для ряда простейших молекул, распространенных в газовой фазе. Основная информация об энергии сродства атомов и молекул к протону содержится в [22—25]. Чтобы дать представление о погрешностях в измерении *PA*, мы распределили числовые данные по четырем классам точности: *A* — погрешность $\leqslant 1\%$; *B* — $\leqslant 3\%$; *C* $\leqslant 10\%$; *D* — $\leqslant 30\%$.

Таблица 19.8. **Энергия сродства атомов к протону (*PA*)**

Атом	*PA*, эВ	Атом	*PA*, эВ
Ar	3,87 (*A*)	I	6,31 (*B*)
Br	5,73 (*B*)	Kr	4,41 (*B*)
Cl	5,34 (*B*)	N	3,4 (*C*)
Cs	7,59 (*B*)	Ne	2,08 (*B*)
F	3,42 (*A*)	O	5,1 (*B*)
H	2,651 (*A*)	S	6,87 (*B*)
He	1,845 (*A*)	Xe	5,15 (*B*)
		Zn	6,77 (*B*)

Таблица 19.9. **Энергия сродства молекул к протону (*PA*)**

Молекула	*PA*, эВ	Молекула	*PA*, эВ
Двухатомные молекулы			
CO	6,15 (*A*)	HI	6,3 (*C*)
CN	5 (*D*)		
CS	8,2 (*A*)	HS	7,2 (*C*)
H_2	4,40 (*B*)	N_2	4,8 (*C*)
$^2H_2$	4,56 (*B*)	NH	6,1 (*C*)
HBr	6,10 (*A*)	NO	5,50 (*B*)
HCl	5,86 (*B*)	O_2	4,10 (*B*)
HF	4,09 (*B*)	OH	6,2 (*C*)
Трехатомные молекулы			
CH_2	8,6 (*B*)	H_2Se	7,4 (*B*)
CO_2	5,5 (*B*)	H_2Te	7,6 (*B*)
HCN	7,46 (*A*)	NH_2	8,1 (*B*)
H_2O	7,23 (*B*)	NO_2	6,6 (*B*)
HO_2	6,4 (*C*)	N_2O	5,8 (*B*)
H_2S	7,4 (*B*)	PH_2	7,2 (*C*)
		SiH_2	8,7 (*B*)
Четырехатомные и более сложные молекулы			
C_2H_2	5,5 (*C*)	CH_3Cl	6,9 (*C*)
CH_3	5,4 (*C*)	CH_4	5,4 (*B*)
H_2CS	8,0 (*A*)	GeH_4	7,1 (*B*)
HNO_2	8,1 (*C*)	HNO_3	7,5 (*B*)
$(HF)_2$	5,2 (*C*)	SiH_4	6,6 (*B*)
NF_3	6,6 (*C*)	$TiCl_4$	7,6 (*B*)
NH_3	8,9 (*A*)	C_2H_4	6,6 (*B*)
N_2H_2	7,9 (*C*)	$(HF)_3$	5,8 (*C*)
PH_3	8,07 (*A*)	SF_6	3,7 (*C*)
SO_3	6,2 (*B*)	C_2H_6	6,9 (*B*)
CF_4	5,2 (*C*)		

19.6. ЭФФЕКТИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ ЭЛЕКТРОНАМИ

Сечение i-кратной ионизации σ^{i+} есть отношение вероятности образования в единицу времени иона кратности i к плотности потока электронов. Сечение полной ионизации σ_n связано с σ^{i+} соотношением $\sigma_n = \sigma^+ + 2\sigma^{2+} + 3\sigma^{3+} + \ldots$ При энергии электронов, меньшей порога двукратной ионизации, σ_n совпадает с σ^+. Полное сечение ионизации определяет вероятность образования в единицу времени полного (суммарного) положительного

Таблица 19.10. **Константы a, b и c эмпирической формулы (19.2) для сечений ионизации оболочек атомов. Постоянная n может принимать значения 4, 5, 6 и 7 для s-оболочек; 4,5 и 6 для p-оболочек; 5 и 6 для d-оболочек; 4 и 5 для f-оболочек, константа a имеет единицу 10^{-14} см^2 · эВ^2**

Константа	$1s$	$1s^2$	$2p$	$2p^2$	$2p^3$	$2p^4$	$2p^5$	$2p^6$	$3d$	$3d^2$	$3d^3$	$3d^4$	$3d^5$	$3d^6$	$3d^7$	$3d^8$	$3d^9$	$3d^{10}$
a	4	4	3,8	3,5	3,2	3,0	2,8	2,6	3,7	3,4	3,1	2,8	2,5	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4
b	0,60	0,75	0,6	0,7	0,8	0,85	0,90	0,92	0,6	0,7	0,8	0,85	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96
c	0,56	0,50	0,4	0,3	0,25	0,22	0,20	0,19	0,4	0,3	0,25	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13
Константа	$2s$	$2s^2$	$3p$	$3p^2$	$3p^3$	$3p^4$	$3p^5$	$3p^6$	$4d$	$4d^2$	$4d^3$	$4d^4$	$4d^5$	$4d^6$	$4d^7$	$4d^8$	$4d^9$	$4d^{10}$
a	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3,8	3,5	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0
b	0,3	0,5	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,6	0,3	0,45	0,6	0,7	0,8	0,85	0,90	0,92	0,93	0,94
c	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,45	0,4	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15
Константа	$3s$	$3s^2$	np	np^2	np^3	np^4	np^5	np^6	nd	nd^2	nd^3	nd^4	nd^5	nd^6	nd^7	nd^8	nd^9	nd^{10}
a	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4
b	0	0,3	0	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0	0,2	0,3	0,45	0,6	0,7	0,8	0,85	0,90	0,92
c	0	0,6	0	0	0,6	0,6	0,6	0,5	0	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25	0,20	0,18	0,17
Константа	ns	ns^2	nf	nf^2	nf^3	nf^4	nf^5	nf^6	nf^7	nf^8	nf^9	nf^{10}	nf^{11}	nf^{12}	nf^{13}	nf^{14}		
a	4	4	3,7	3,4	3,1	2,8	2,5	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0		
b	0	0	0,6	0,7	0,8	0,85	0,90	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97		
c	0	0	0,4	0,3	0,25	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11		

заряда и в случае ионизации молекул включает также диссоциативную ионизацию электронами.

При энергии электронов E, значительно превышающей потенциал ионизации U_α оболочки α атома, сечение ионизации описывается соотношением Бете [26, 27]

$$\sigma_\alpha^+ = a_\alpha q_\alpha \ln(E/U_\alpha)/EU_\alpha, \qquad (19.1)$$

где a_α — константа, значение которой, как показывает сравнение с экспериментом, при $E \gg U_\alpha$ может изменяться от 2,6 до $4{,}5 \cdot 10^{-16}$ см^2 · эВ^2 [27]; q_α — число эквивалентных электронов на оболочке α. Формула Бете лежит в основе многих эмпирических соотношений, используемых для аппроксимации сечений ионизации атомов. Наиболее часто для сечений однократной ионизации атомов из основного состояния используется аппроксимация, предложенная Лотцем [27, 28]:

$$\sigma^+ = \sum_\alpha a_\alpha q_\alpha \frac{\ln(E/U_\alpha)}{EU_\alpha} \times$$

$$\times \{1 - b_\alpha \exp[c_\alpha - (E/U_\alpha - 1)]\}, \qquad (19.2)$$

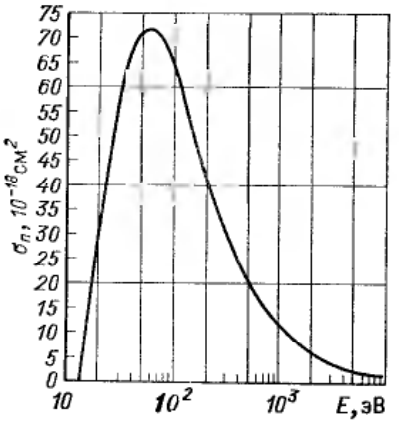


Рис. 19.1. Сечение ионизации H (относительная погрешность ±7%) [31]

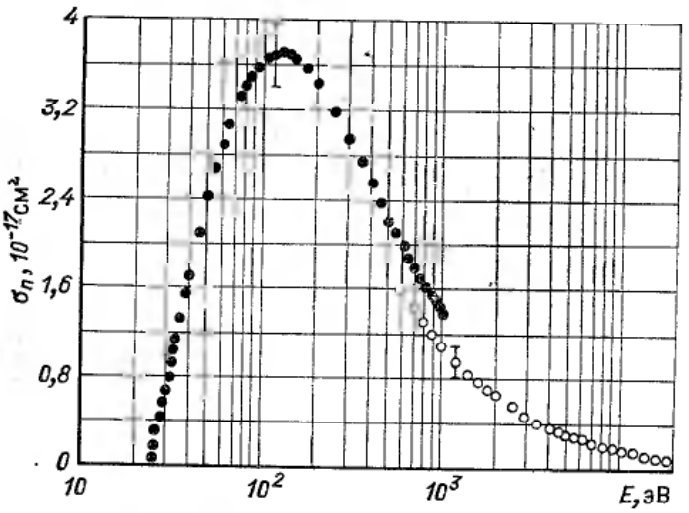


Рис. 19.2. Сечение ионизации He:
● — [32]; ○ — [33]

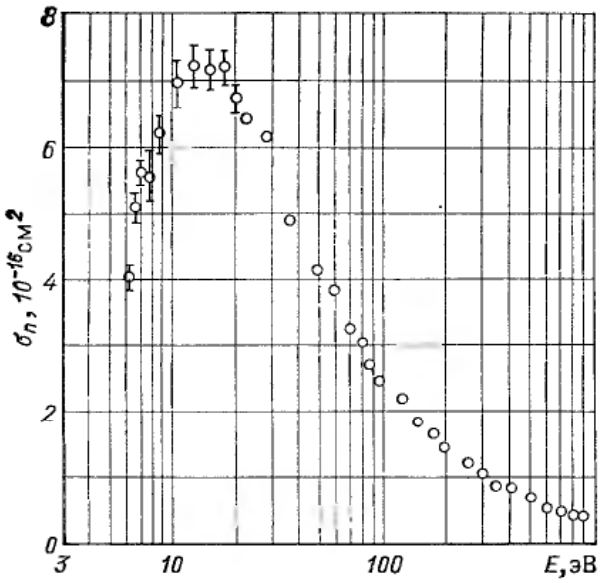


Рис. 19.3. Полное сечение ионизации He из метастабильного состояния 2^3S [34]

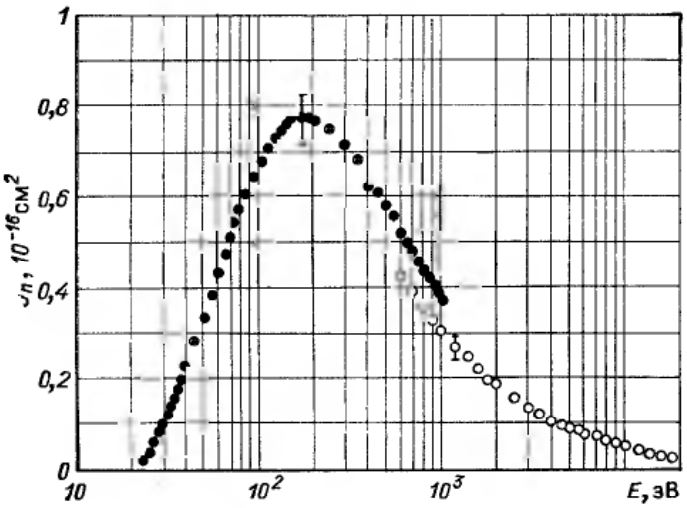


Рис. 19.4. Сечение ионизации Ne:
● — [32]; ○ — [33]

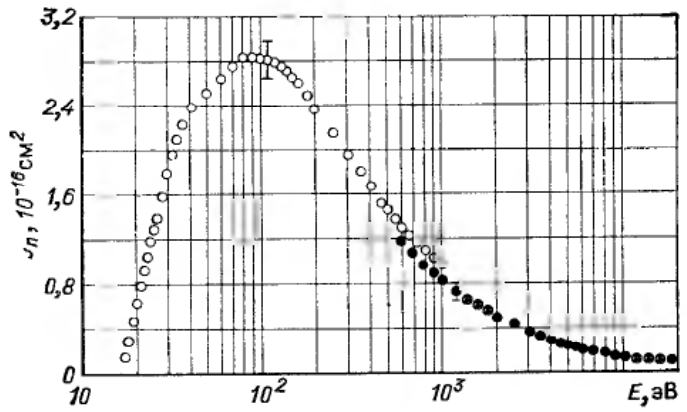


Рис. 19.5. Сечение ионизации Ar:
○ — [32]; ● — [33]

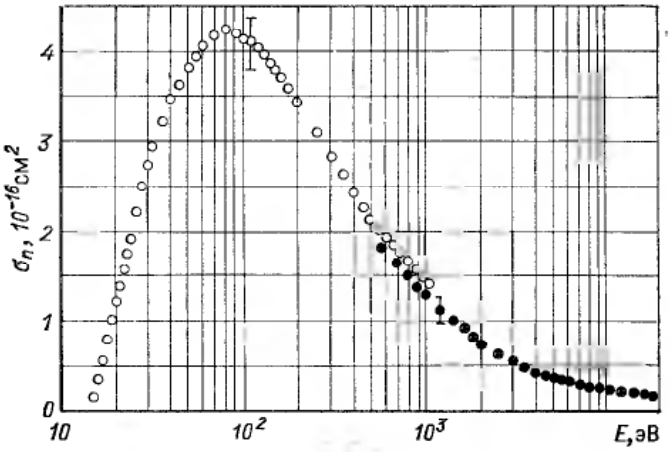


Рис. 19.6. Сечение ионизации Kr:
○ — [32]; ● — [33]

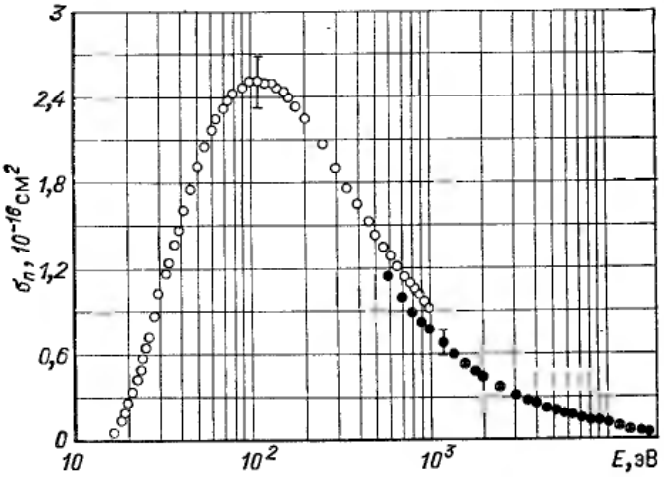


Рис. 19.7. Сечение ионизации Xe:
○ — [32]; ● — [33]

где a_α, b_α и c_α — постоянные для данной оболочки, определяемые из сравнения с экспериментом. В табл. 19.10 приведены эти постоянные для различных оболочек атомов [28]. Погрешность аппроксимации составляет 40—30% [28], она может превышать эти значения вблизи порога ионизации и максимума сечения. Аппроксимация не учитывает вклад в суммарное сечение ионизации возбуждения автоионизационных состояний атомов. На рис. 19.1—19.34 приведены значения сечения для элементов и молекул.

Удобные для практического использования аппроксимации результатов расчетов в борновском приближении сечений и скоростей ионизации ряда атомов и атомарных ионов приведены в монографиях Л. А. Вайнштейна и др. [29, 30].

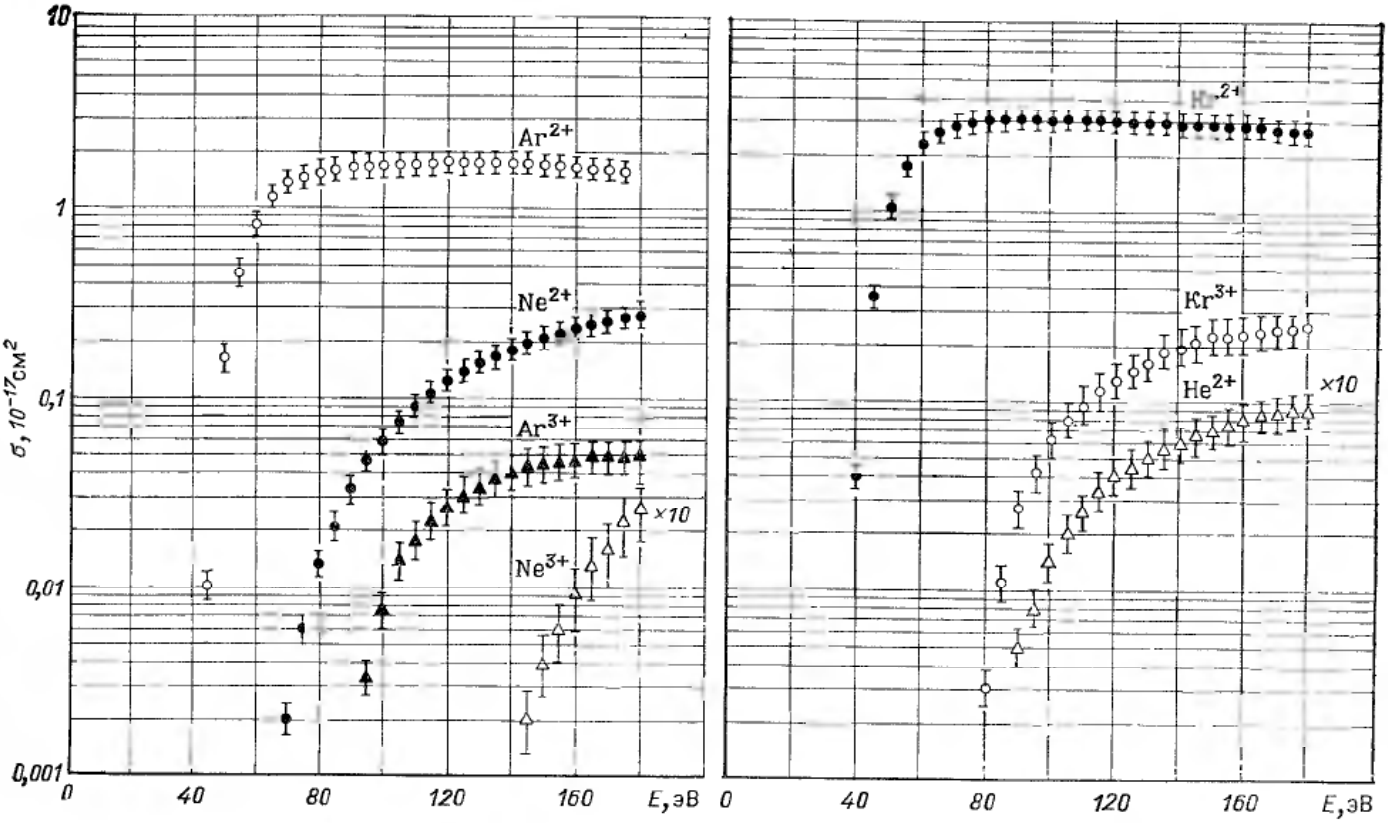


Рис. 19.8. Сечение многократной ионизации инертных газов [35]

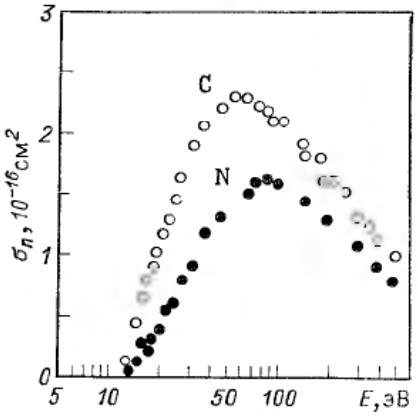


Рис. 19.9. Полные сечения ионизации C и N [36]

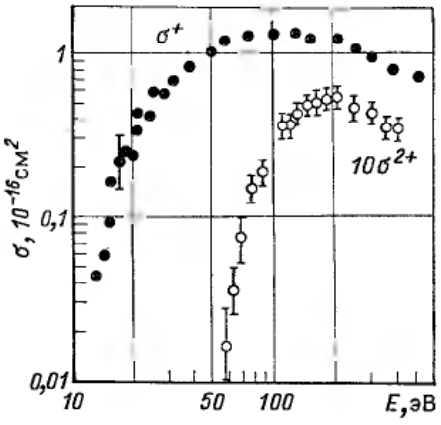


Рис. 19.10. Сечения ионизации O:
σ^+ —[36]; σ^{2+} —[37]

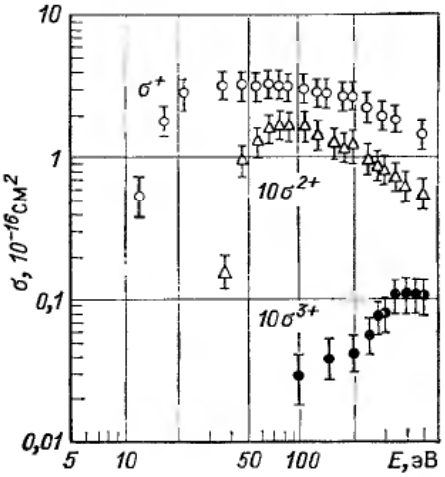


Рис. 19.11. Сечения ионизации S [38]

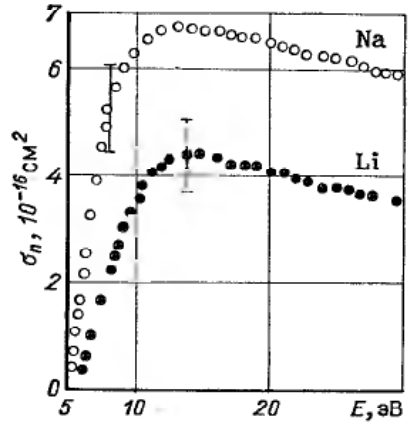


Рис. 19.12. Полные сечения ионизации Li и Na [39]

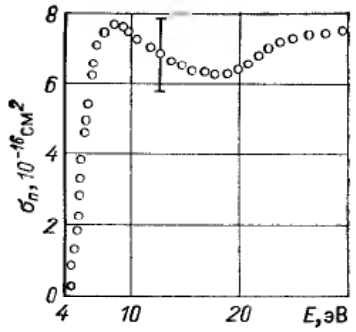


Рис. 19.13. Полное сечение ионизации K [39]

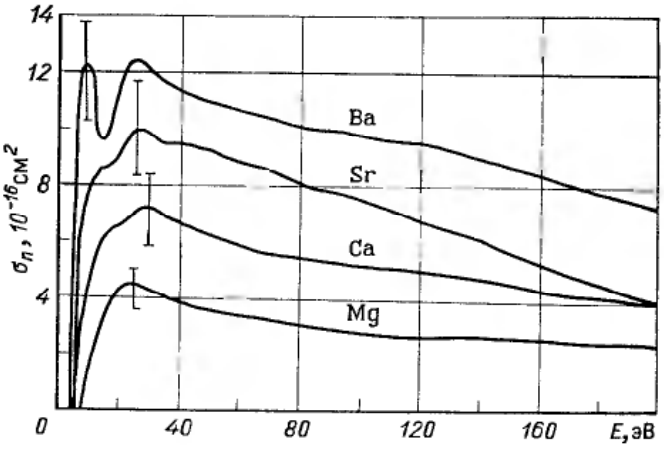


Рис. 19.16. Полные сечения ионизации щелочноземельных металлов [42]

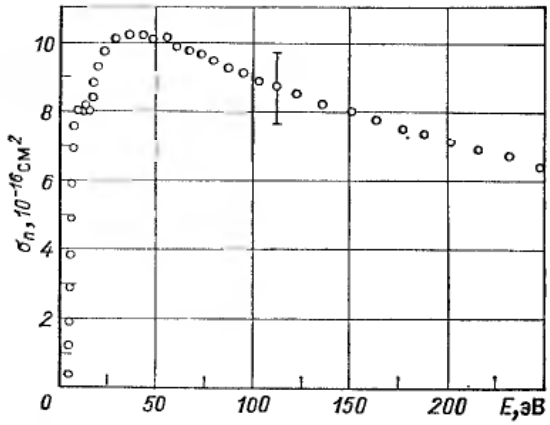


Рис. 19.14. Полное сечение ионизации Rb [40]

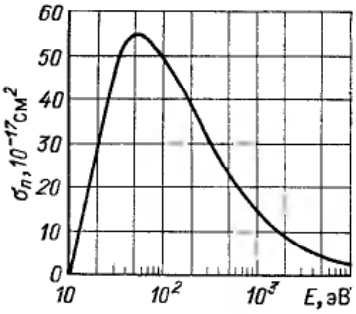


Рис. 19.17. Полное сечение ионизации Hg (относительная погрешность ±20%) [43, 44]

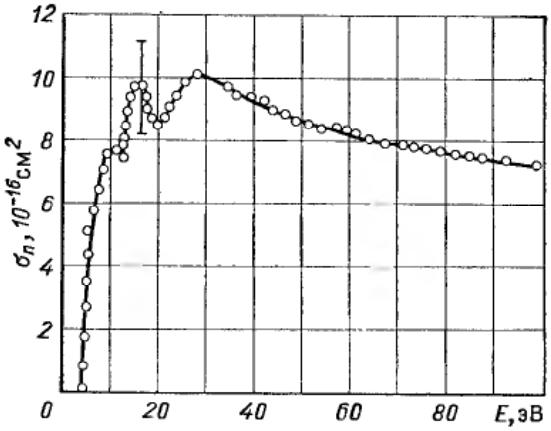


Рис. 19.15. Полное сечение ионизации Cs [41]

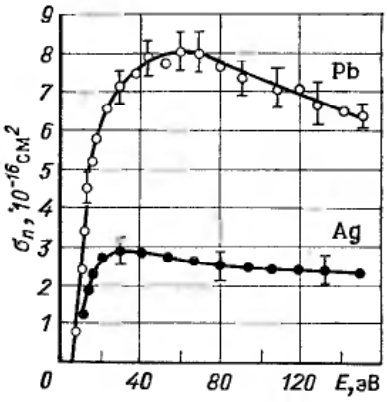


Рис. 19.18. Полное сечение ионизации Pb и Ag [45]

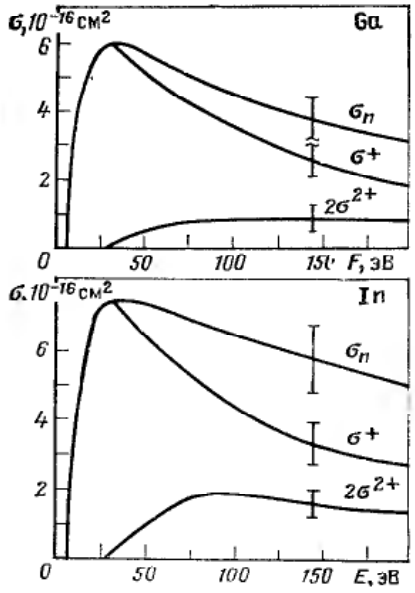


Рис. 19.19. Сечение ионизации Ga и In [46]

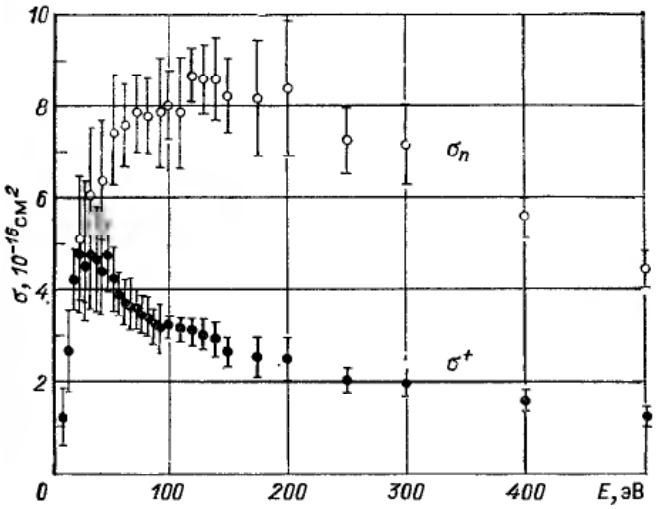


Рис. 19.20. Сечение полной и однократной ионизации U [47]

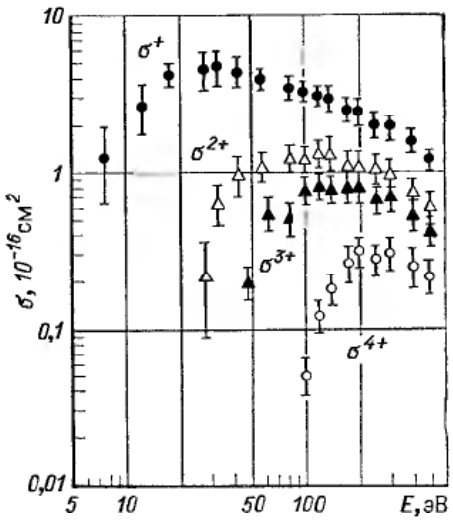


Рис. 19.21. Сечение многократной ионизации U [47]

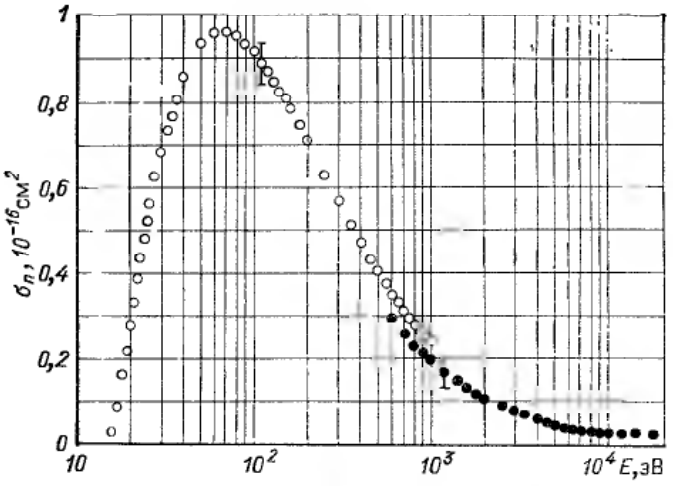


Рис. 19.22. Полное сечение ионизации H_2:
○ — [32]; ● — [33]

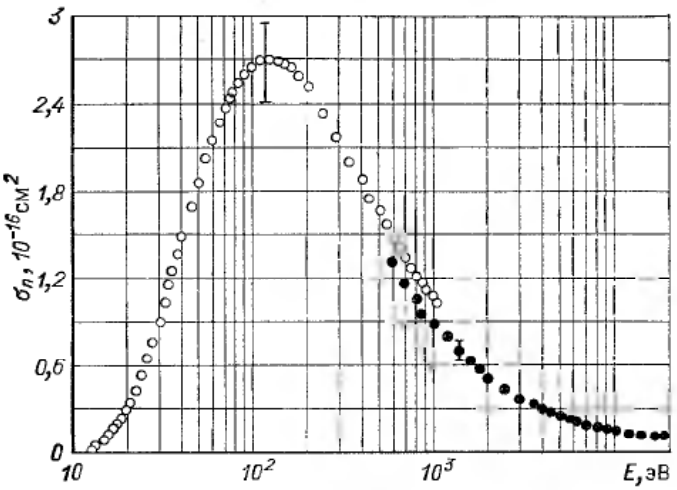


Рис. 19.23. Полное сечение ионизации N_2:
○ — [32]; ● — [33]

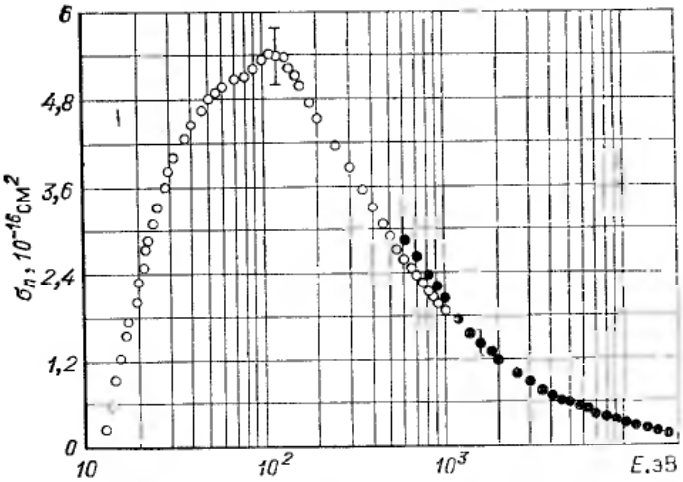


Рис. 19.24. Полное сечение ионизации O_2:
○ — [32]; ● — [33]

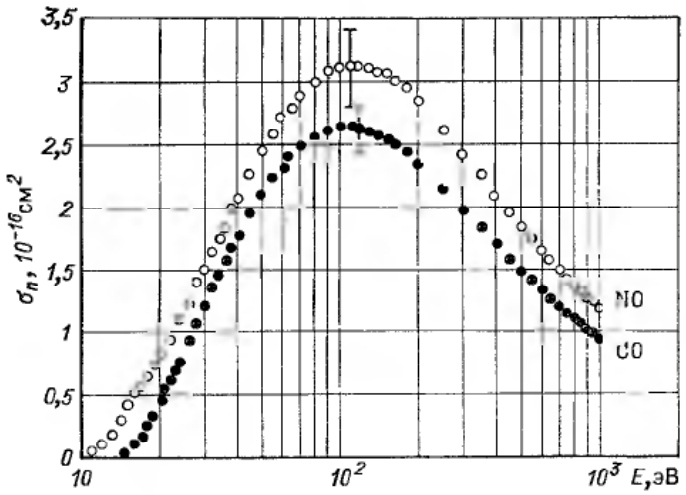


Рис. 19.25. Полное сечение ионизации CO и NO [32]

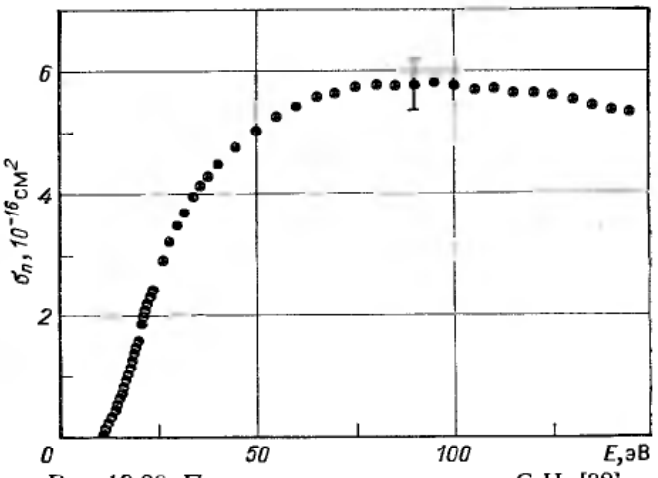


Рис. 19.28. Полное сечение ионизации C_2H_4 [32]

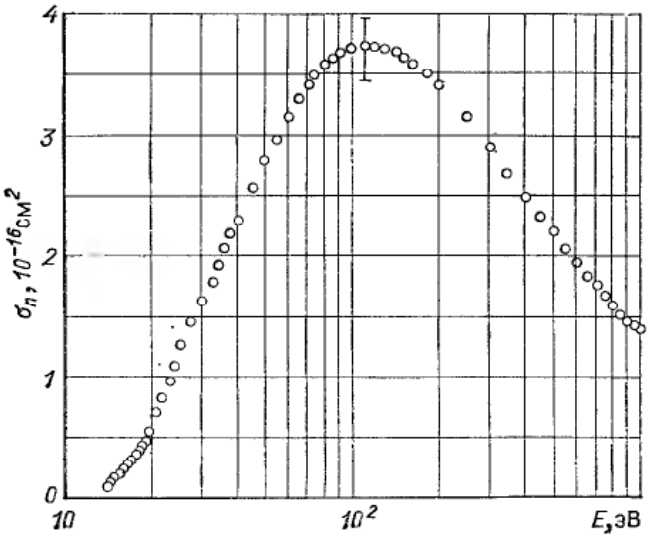


Рис. 19.26. Полное сечение ионизации N_2O [32]

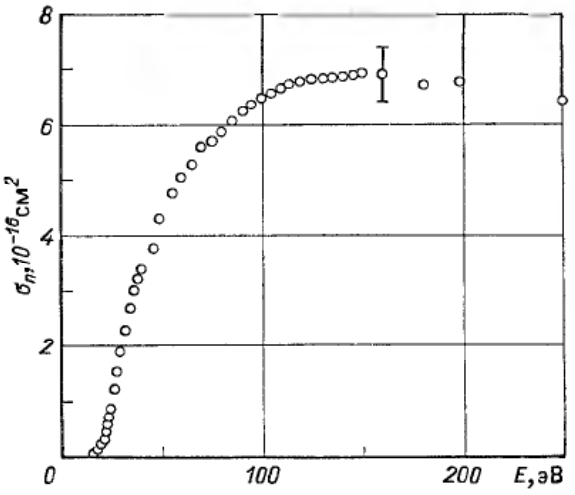


Рис. 19.29. Полное сечение ионизации SF_6 [32]

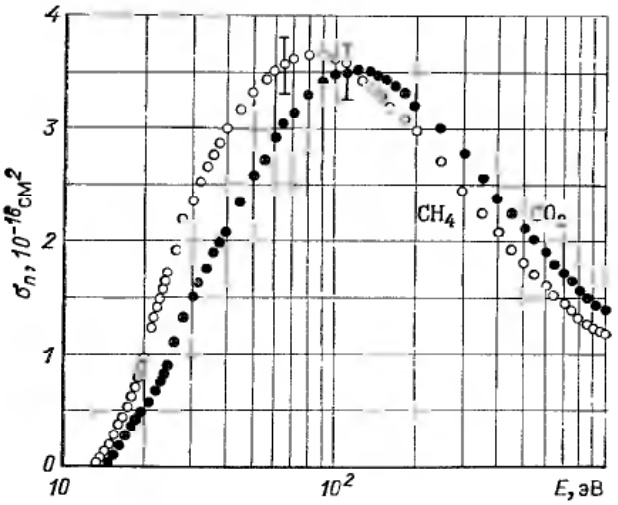


Рис. 19.27. Полное сечение ионизации CO_2 и CH_4 [32]

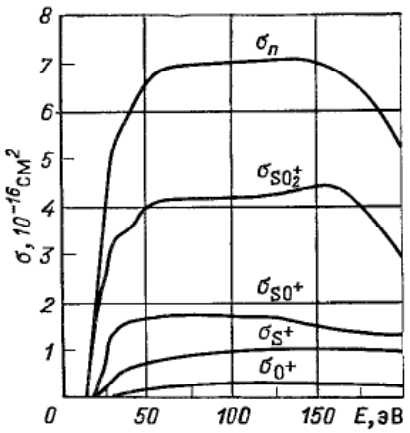


Рис. 19.30. Сечение полной и диссоциативной ионизации SO_2 [48]

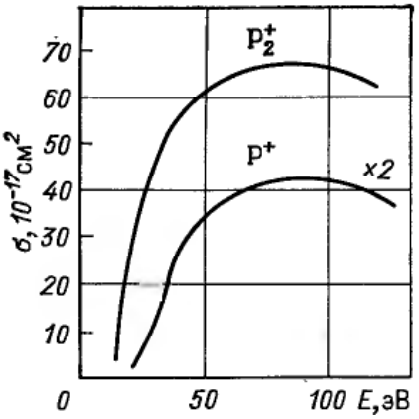


Рис. 19.31. Сечение ионизации P_2 [49]

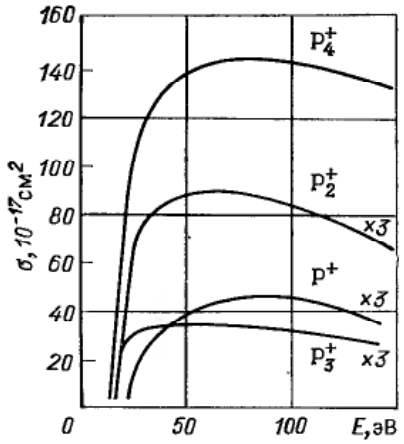


Рис. 19.32. Сечение ионизации P_4 [49]

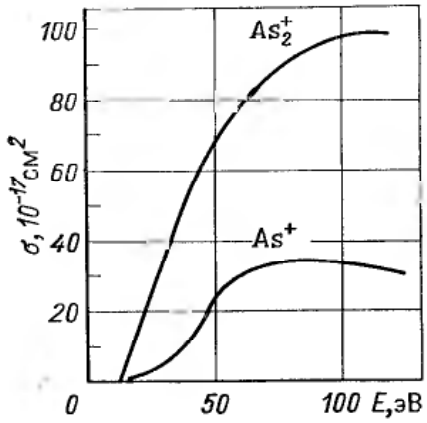


Рис. 19.33. Сечение ионизации As_2 [49]

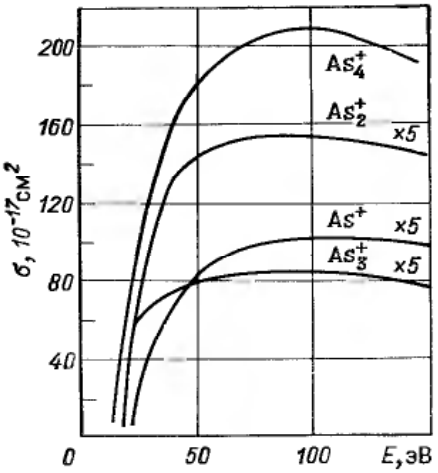


Рис. 19.34. Сечение ионизации As_4 [49]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Edlèn B.** Atomic spectra//Spectroscopy I/Ed. by S. Flügge. Encyclopedia of Physics. Berlin: Springer. 1964. Vol. 27. P. 79—220.

2. **Moore C. E.** Ionization potentials and ionization limits derived from optical spectra/Nat. Stand. Ref. Data Ser. Nat. Bur. Stand. Vol. 34. Washington: NBS, 1970.

3. **Martin W. C., Zalubas R., Hagan L.** Atomic energy levels. The rare-earth elements/Nat. Stand. Ref. Data Ser. Nat. Bur. Stand. Vol. 60. Washington: NBS, 1978.

4. **Worden E. F., Conway J. G.** Multistep laser photoionization of the lanthanides and actinides//Lanthanide and Actinide Chemistry and Spectroscopy. Amer. Chem. Soc. Symp. Series 131/Ed. by N. M. Edelstein. Washington: Amer. Chem. Soc. 1980. Chap. 19. P. 381—425.

5. **Kelly R. L.** Atomic and ionic spectrum lines below 2000 Å (**H** through **Ar**)/Preprint ORNL-5922. Oak Ridge, Tennessee, Oct. 1982.

6. **Радциг А. А., Смирнов Б. М.** Параметры атомов и атомных ионов. М.: Энергоатомиздат. 1986.

7. **Хьюбер К. П., Герцберг Г.** Константы двухатомных молекул: Пер. с англ./Под ред. Н. Н. Соболева. М.: Мир. 1984.

8. **Энергии** разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону/Л. В. Гурвич, Г. В. Карачевцев, В. Н. Кондратьев и др.; Под ред. В. Н. Кондратьева. М.: Наука, 1974.

9. **Карлсон Т. А.** Фотоэлектронная и оже-спектроскопия: Пер. с англ. Л.: Машиностроение. 1981. Приложение I.

10. **Shirley D. A., Martin R. L., Kowalczyk S. P. e. a.**// Phys. Rev. 1977. Vol. B15. P. 544—552.

11. **Mehlhorn W., Breuckmann B., Hausamann D.**// Phys. Scripta. 1977. Vol. 16. P. 177—185.

12. **Porter F. T., Freedman M. S.**//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1978. Vol. 7. P. 1267.

13. **Sevier K. D.**//Atom. Data Nucl. Data Tabl. 1979. Vol. 24. P. 323—371.

14. **Fuggle J. C., Martensson N.**//J. Electron Spectr. Relat. Phenomena. 1980. Vol. 21. P. 275.

15. **Siegbahn H., Karlsson L.** Photoelectron spectroscopy//Encyclopedia of Physics. Vol. 31/Ed. by W. Mehlhorn. Berlin: Springer. 1982. P. 215—467.

16. **Jolly W. L., Bomben K. D., Eyermann C. J.**//Atom. Data Nucl. Data Tabl. 1984. Vol. 31. P. 433—493.

17. **Месси Г.** Отрицательные ионы: Пер. с англ. М.: Мир, 1979.

18. **Смирнов Б. М.** Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1978.
19. **Hotop H., Lineberger W. C.**//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1975. Vol. 4. P. 539—576; 1985. Vol. 14. P. 731—750.
20. **Mead R. D., Stevens A. E., Lineberger W. C.** Photodetachment in negative ion beams//Gas Phase Ion Chemistry/Ed. by M. T. Bowers. N. Y.: Academic, 1984. Vol. 3. Chap. 22.
21. **Drzaic P. S., Marks J., Brauman J. I.** Electron photodetachment form gas phase molecular anions//Ibid. Chap. 21.
22. **Christodoulides A. A., McCorkle D. L., Christophorou L. G.** Electron affinities of atoms, molecules, and radicals//Electron—Molecule Interactions and Their Applications/Ed. by L. G. Christophorou. N. Y., Lond.: Academic, 1984. Vol. 2. P. 423—641.
23. **Walder R., Franklin J. L.**//Intern. J. Mass Spectrom. Ion Phys. 1980. Vol. 36. P. 85.
24. **Lias S. G., Liebman J. F., Levin R. D.**//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1984. Vol. 13. P. 695.
25. **Raksit A. B., Bohme D. K.**//Intern. J. Mass Spectrom. Ion Proc. 1984. Vol. 57. P. 211.
26. **Bethe H. A.**//Ann. Phys. 1930. Vol. 5. P. 325.
27. **Lotz W.**//Z. Phys. 1967. Vol. 206. P. 205—211.
28. **Lotz W.**//Ibid. 1970. Vol. 232. P. 101—107.
29. **Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А.** Сечения возбуждения атомов и ионов электронами. М.: Наука. 1973
30. **Вайнштейн Л. А., Собельман И. И., Юков Е. А.** Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М.: Наука. 1979.
31. **Bell K. L., Gilbody H. B., Hughes J. G. e. a.**// J. Phys. Chem. Ref. Dat. 1983. Vol. 12. P. 891—916.
32. **Rapp D., Englander—Golden P.**//J. Chem. Phys. 1965. Vol. 43. P. 1464—1479.
33. **Schram B. L., De Heer F. J., Van der Wiel M. J., Kistemaker J.**//Physica. 1965. Vol. 31. P. 94—112.
34. **Dixon A. J., Harrison M. F., Smith A. C. H.**// J. Phys. B: Atom. and Molec. Phys. 1976. Vol. 15. P. 2617—2631.
35. **Stephan K., Helm H., Märk T. D.** J. Chem. Phys. 1980. Vol. 73. P. 3763—3778.
36. **Brook E., Harrison M. F. A., Smith A. C. H.**// J. Phys. B: Atom. and Molecular. Phys. 1978. Vol. 11. P. 3115—3123.
37. **Ziegler D. I., Newman J. H., Smith K. A., Stebbings R. F.**//Plant. and Space Sci. 1982. Vol. 30. P. 451—456.
38. **Ziegler D. L., Newman J. H., Goeller L. N. e. a.**// Ibid. P. 1269—1274.
39. **Запесочный И. И., Алексахин И. С.** Ионизация атомов щелочных металлов медленными электронами// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1968. Т. 55. С. 76—85.
40. **Nygaard K. J., Hahn Yu. B.**//J. Chem. Phys. 1973. Vol. 58. P. 3494—3499.
41. **Nygaard K. J.**//Ibid. 1968. Vol. 49. P. 1995—2002.
42. **Вайнштейн Л. А., Очкур В. И., Раховский В. И., Степанов А. М.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1971. Т. 61. С. 511—519.
43. **Kieffer L. J., Dunn G. H.**//Rev. Mod. Phys. 1966. Vol. 38. P. 1—35.
44. **Lotz W.**//Astrophys. J. Suppl. 1967. Vol. 14. P. 207—219.
45. **Павлов С. И., Раховский В. И., Федорова Г. М.**// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1967. Т. 52. С. 21—28.
46. **Головач Д. Г., Раховский В. И., Шустряков В. М.** //Измерительная техника. 1986. № 2. С. 52—53.
47. **Halle J. C., Lo H. H., Fite W. L.**//Phys. Rev. 1981. Vol. 23A. P. 1708—1716.
48. **Orient O. J., Srivastava S. K.**//J. Chem. Phys. 1984. Vol. 80. P. 140—143.
49. **Monnom G., Gancherel Ph., Paparoditis C.**//J. Phys. 1984. Vol. 45. P. 77—84.

ГЛАВА 20

ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

А. В. Елецкий

20.1. ДИФФУЗИЯ И ПОДВИЖНОСТЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

В идеальной слабоионизованной плазме, где степень ионизации удовлетворяет условию $N_e/N_a \ll (kT_e/\mathrm{Ry})^2$ (N_e, N_a — плотность электронов и нейтральных частиц соответственно; T_e — температура электронов; Ry=13,6 эВ — атомный масштаб энергии), диффузия заряженных частиц (электронов и ионов) определяется в основном парными соударениями этих частиц с нейтральными частицами (атомами и молекулами). При этом плотность нейтральных и заряженных частиц должна удовлетворять критериям идеальности

$$N_a \ll 1/a_0^3; \tag{20.1}$$

$$N_e \ll (kT_e)^3/e^6, \tag{20.2}$$

где e — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; a_0 — размер атома. При малых значениях напряженности электрического поля, когда средние энергии заряженных и нейтральных частиц различаются несущественно, коэффициент диффузии заряженных частиц D связан с их подвижностью K соотношением Эйнштейна

$$D = \frac{kT}{e} K. \tag{20.3}$$

Подвижность заряженных частиц K определяется соотношением $K=w/E$, где w—дрейфовая скорость заряженных частиц в электрическом поле напряженностью E. При высокой напряженности электрического поля E, когда функция распределения заряженных частиц отличается от максвелловской и их «температура» не имеет прямого физического смысла, соотношение (20.3) справедливо приближенно, с погрешностью 10—15%, если при этом под «температурой» заряженных частиц понимать величину, связанную с их средней энергией $\overline{\varepsilon}$ соотношением $\overline{\varepsilon} = \frac{3}{2} kT$. В плазме, основной механизм проводимости которой связан с движением электронов под действием электрического поля, подвижность электронов K_e связана с проводимостью плазмы σ соотношением

$$K_e = \sigma/eN_e. \tag{20.4}$$

Соотношения (20.3), (20.4) позволяют определить коэффициент диффузии электронов на основании данных по электропроводности слабоионизованной плазмы.

Если характерный размер, на котором заметно изме-

Таблица 20.1. **Дрейфовая скорость w_e, 10^5 см/с, и отношение $eD_\perp/K$, эВ, для электронов в газе [1]**

E/N, 10^{-17} В·см²	He		Ne		Ar		Kr		Xe	
	w_e	$eD_\perp/K$	w_e	$eD_\perp/K$	w_e	$eD_\perp/K$	w_e	$eD_\perp/K$	w_e	$eD_\perp/K$
0,03	0,7	0,034	1,3	—	1,2	0.94	1		0,16	
0,05	1	0,042	1,6	—	1,4	1,2	1,2		0,5	
0,07	1,3	0,051	1,8	—	1,5	1,3	1,2		0,74	
0,1	1,6	0,065	2,1	0,4	1,6	1,5	1,3		0,88	
0,3	2,8	0,15	3,4	0,91	2,2	2,3	1,6		1,1	
0,5	3,7	0,24	4,3	1,4	2,5	2,8	1,7		1,2	
0,7	4,3	0,32	5	1,8	2,7	3,2	1,9		1,3	
1	5,1	0,43	5,8	2,5	3	3,8	2		1,4	
3	8,8	1,2	15	5,2	4	7,2	3,2		1,8	
5	12	2,3	19	6	4,9	8,2	—		—	
7	16	3	26	6,4	7,2	8,2	—		—	
10	25	3,6	38	6,9	11	7,7	—		—	
30	68	5,3	100	—	26	7,7	—		—	
50	130	6,6	150	—	42	7,1	—		—	
70	190	7,3	200	—	55	6,4				
100	280	8,2	260	—	74	6,4	—		65	
200	580	11	460	—	120	6,2	—		130	
300	880	14	640	—	—	5,8	—		180	
500	1400	16	—	—	—	6,6	—		250	
800	1700	18	—	—	—	7,8	—		—	
1000	—	—	—	—	—	8,5	—		—	

E/N, 10^{-17} В·см²	H_2		D_2		N_2		O_2		CO_2	
0,03	0,46	0,027	0,46	0,026	1,1	0,028	2,6	—	0,054	—
0,05	0,74	0,028	0,74	0,027	1,6	0,031	3,7	—	0,095	—
0,07	1	0,029	1	0,029	2	0,035	4,1	—	0,14	0,026
0,1	1,4	0,032	1,4	0,031	2,4	0,042	4,3	—	0,19	0,026
0,3	3,1	0,046	3	0,048	3,1	0,1	5,4	—	0,54	0,026
0,5	4,3	0,059	4	0,067	3,5	0,16	7,3	—	0,89	0,026
0,7	5,2	0,074	4,7	0,088	3,9	0,20	9,2	—	1,2	0,026
1	6,2	0,095	5,4	0,12	4,4	0,28	10	0,14	1,8	0,026
3	9,8	0,23	8,9	0,28	7,5	0,61	22	0,3	5,4	0,03
5	13	0,33	11	0,39	11	0,74	26	0,49	9,1	0,035
7	15	0,41	14	—	14	0,84	28	0,73	13	0,043
10	19	0,51	17	—	18	0,93	31	1,1	21	0,065
30	37	1	—	—	42	1,2	72	2,4	120	0,99
50	57	1,7	—	—	61	1,4	110	2,9	130	1,7
70	83	2,2	—	—	79	1,5	120	3,0	130	2,4
100	130	2,7	—	—	100	1,9	160	3,4	130	3,2
200	340	3,8	—	—	200	3,4	260	—	180	4,4
300	470	4,5	—	—	290	4,2	330	—	240	5,0
500	730	5,4	—	—	420	—	450	—	320	6,5
800	960	6,5	—	—	530	—	640	—	420	7,1
1000	1200	7,1	—	—	590	—	710	—	490	7,9

E/N, 10^{-17} В·см²	CO		NO		H_2O (пар)		CH_4		CF_4 [2]		SF_6 [2]	
0,3	7,4	0,045	7,8	—	—	—	—	—	30	—	—	—
0,5	7,7	0,063	8,6	—	—	—	—	—	45	—	—	—
0,7	9	0,08	9,1	—	—	—	—	—	57	—	—	—
1	10	0,09	12	—	—	—	—	—	68	—	—	—
3	18	0,18	26	0,2	0,7	—	100	—	100	—	—	—
5	22	0,25	32	0,23	1,2	—	110	—	115	—	—	—
7	25	0,32	38	0,25	1,6	—	95	—	130	—	—	—

Продолжение табл. 20.1

E/N, 10^{-17} В·см²	CO		NO		H_2O (пар)		CH_4		CF_4 [2]		SF_6 [2]	
10	26	0,42	47	0,28	2,3	—	85	—	150	0,1	43	—
30	39	0,82	66	0,63	7,5	—	75	—	—	0,6	53	—
50	52	1,1	84	1,1	27	—	—	—	—	1,7	77	—
70	66	1,3	—	—	58	0,022	—	—	—	3,0	86	—
90	85	1,4	—	—	110	0,029	—	—	150	3,7	97	—
100	96	1,6	—	—	—	—	74	4,9	170	4	100	—
200	230	2,8	—	—	—	—	150	5,2	220	5,0	160	—
300	290	3,7	—	—	—	—	190	5,1	300	5,5	190	5,1
300	430	5,1	—	—	—	—	280	5,3	—	—	260	5,5
800	—	—	—	—	—	—	400	6,6	—	—	340	6,8
1000	—	—	—	—	—	—	470	7,8	—	—	360	—

Продолжение табл. 20.1

E/N, 10^{-17} В·см² [2]	I_2		N_2O		C_3F_8		C_4F_{10}		CCl_2F_2		Cl_2		Br_2		NH_3	HCl
0,1	—	—	0,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,2	—	—	1,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,4	—	—	2,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,17	—
0,6	—	—	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,27	—
0,8	—	—	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,36	—
1	—	—	7,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,45	—
2	—	—	18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,85	—
4	—	—	37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,8	—
6	—	—	53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,7	—
8	—	—	65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,4	3
10	—	—	80	0,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,4	4
20	—	—	—	0,51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,1	10	9
40	—	0,75	—	1,2	—	—	—	—	—	—	95	1,8	63	2,6	50	27
60	—	1,9	—	1,9	—	—	—	—	—	—	94	2,3	74	2,8	110	61
80	80	3,1	—	2,45	—	—	—	—	—	—	92	2,6	80	3,0	—	88
100	82	3,3	—	3,1	—	—	—	—	—	—	94	2,8	82	3,1	—	100
200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	115	3,2	103	3,1	—	130
300	—	—	—	—	160	3,1	140	2,85	—	3,7	—	—	—	—	—	—
400	—	—	—	—	190	3,8	150	3,4	190	3,7	—	—	—	—	—	—
500	—	—	—	—	220	4,3	170	3,9	220	3,8	—	—	—	—	—	—
600	—	—	—	—	240	4,6	200	—	250	3,9	—	—	—	—	—	—
800	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,1	—	—	—	—	—	—
1000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

няется плотность заряженных частиц в плазме. много больше радиуса Дебая

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{8\pi N_e e^2}},$$

плазма является квазинейтральной, т. е. плотности положительных и отрицательных зарядов равны. При этом имеет место совместная диффузия заряженных частиц разного знака (амбиполярная диффузия) с коэффициентом диффузии D_a, единым для электронов и ионов и выражающимся через коэффициент диффузии ионов в этом же газе D_i:

$$D_a = D_i(1 + T_e/T_i), \qquad (20.5)$$

где T_i и T_e — температура ионов и электронов соответственно. Соотношение (20.5) выполняется с той же точностью, что и соотношение Эйнштейна (20.3).

Основными характеристиками движения электронов в газе под действием электрического поля являются коэффициент поперечной диффузии $D_\perp$ и дрейфовая скорость электронов w_e. Однако поскольку коэффициент поперечной диффузии электронов в газе является функцией плотности частиц газа, в качестве справочных обычно используют значения w_e и характеристической энергии электронов $\overline{\varepsilon}_e$, определяемой как отношение $D_\perp$ к подвижности электронов K_e. Оба эти параметра являются однозначными функциями отношения напряженности электрического поля E к плотности частиц газа N_a. В табл. 20.1 приведены измеренные значения $\overline{\varepsilon}_e$ и w_e для некоторых газов при различных значениях отношения E/N_a. В табл. 20.2 представлены значения коэффициента диффузии ионов D_i при атмосферном давлении и нулевом электрическом поле.

Таблица 20.2. Коэффициент диффузии ионов D_i, см²/с, в различных газах при нулевом электрическом поле и атмосферном давлении [3—7]. (В случаях, когда температура газа отлична от 300 К, ее значение указано в скобках)

Ион	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rb	Cs	Hg	H_2	D_2	N_2	O_2	NO	CO	SF_6	Cl_2	Br_2	CH_4	CO_2
He^+	0,27	0,44	—	0,116	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
He_2^+	0,43	0,24	0,098	0,076	0,059	—	—	—	0,28	—	0,098	0,103	—	0,094	—	—	—	—	0,078
Ne^+	0,79	0,107	0,069	0,052	0,039	—	—	—	0,27	—	0,073	0,074	—	0,070	—	—	—	—	0,054
$HeNe^+$	0,66	0,17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ne_2^+	0,45	0,16	0,056	0,040	0,030	—	—	—	0,26	—	0,061	0,062	—	0,058	—	—	—	—	(,044
Ar^+	0,50	0,14	0,039	0,040	0,030	—	—	—	0,26	0,21	0,061	0,062	—	0,058	—	0,033	—	—	0,044
Kr^+	0,52	0,12	0,056	0,024	0,022	—	—	—	0,26	0,20	0,053	0,054	0,060	0,05	—	0,027	—	—	0,037
Xe^+	0,46	0,12	0,045	0,029	0,015	—	—	—	0,28	0,20	0,046	0,103	0,057	0,094	—	0,024	0,016	0,059	0,035
H^+	0,82	0,63	—	0,23	—	—	—	—	0,40	0,45	0,098	0,2	0,28	0,29	—	0,17	—	—	0,22
D^+	0,64	0,42	—	0,16	—	—	—	—	—	0,29	0,20	—	0,19	0,20	—	0,12	—	—	0,16
Hg^+	0,51	0,154	0,056	0,030	—	—	—	0,066 (350)	—	0,20	0,055	0,54	0,055	0,063	—	0,023	0,015	0,058	0,037
N^+	0,52	0,197	—	0,066	—	—	—	—	—	0,23	0,078	—	0,16	0,17	—	0,049	—	—	—
N_2^+	0,49	0,22	0,059	0,047	0,034	—	—	—	0,26	0,21	—	0,067	0,15	0,063	—	0,037	—	—	—
O^+	0,54	0,19	0,089	0,062	—	—	—	—	—	0,22	0,085	—	0,15	0,16	—	0,046	—	—	0,049
H_2^+	0,64	0,42	—	0,16	—	—	—	—	—	—	0,20	—	0,20	0,21	—	0,12	—	—	—
Kr_2^+	—	0,14	—	0,028	0,021	—	—	—	0,29	0,20	—	—	0,056	0,052	—	0,024	0,016	—	—
Xe_2^+	0,36	0,12	0,043	0,026	0,019	—	—	—	0,25	0,20	0,049	0,048	0,054	0,046	—	0,022	0,014	—	0,033
Rb_2^+	—	0,13	—	0,030	0,021	0,016 (621)	0,0055	0,017	0,29	0,21	—	—	0,056	0,056	—	0,023	0,015	—	—
Cs_2^+	—	0,13	—	0,028	0,019	0,0066	0,011 (625)	0,015	0,29	0,20	—	—	0,054	0,051	—	0,022	0,014	—	—
Hg_2^+	—	0,13	—	0,027	0,018	0,0063	0,0047	0,019 (500)	0,29	0,20	—	—	0,054	0,050	—	0,021	0,013	—	—
H_3^+	0,78	0,35	—	0,13	0,104	—	—	—	0,39	0,30	—	—	0,17	0,16	—	0,098	0,082	—	—
D_3^+	—	0,26	—	0,096	0,074	—	—	—	0,33	0,21	—	—	0,12	0,14	—	0,071	0,058	—	—
N_3^+	—	0,15	—	0,043	0,032	—	—	—	0,30	0,21	—	—	0,068	0,062	—	0,032	0,024	—	—
N_4^+	—	0,15	—	0,039	0,028	—	—	—	0,29	0,21	0,058	—	0,063	0,059	—	0,030	0,022	—	—
Ba^+	—	0,14	—	0,031	0,022	—	—	0,018	0,018	0,20	0,06	—	0,057	0,053	—	0,024	0,016	—	—
O_4^+	—	0,14	—	0,038	0,027	—	—	—	0,29	0,21	0,053	0,049	0,062	0,058	—	0,029	0,021	—	—
H^-	1,02	0,58	—	0,23	0,18	0,053	0,047	0,16	0,50	0,45	—	0,056	0,28	0,26	—	0,17	—	—	—
O^-	0,75	0,19	—	0,062	0,047	0,014	0,0125	0,041	0,30	0,22	—	0,83	0,086	0,08	—	0,046	—	—	0,05
O_2^-	0,56	0,16	—	0,047	0,035	0,011	0,0093	0,030	0,33	0,22	—	0,056	0,071	0,066	—	0,035	—	—	—
O_3^-	0,48	0,15	0,63	0,041	0,030	0,0095	0,0080	0,026	0,29	0,21	—	0,066	0,065	0,061	—	0,031	—	—	—
O_4^-	—	0,14	—	0,038	0,027	0,0087	0,0072	0,023	0,29	0,20	—	0,056	0,062	0,058	—	0,029	—	—	—
CO_3^-	—	0,15	0,62	0,038	0,028	0,0089	0,0074	0,023	0,29	0,20	—	0,065	0,063	0,058	—	0,029	—	—	0,033
CO_4^-	0,43	0,14	—	0,036	0,026	0,0083	0,0068	0,021	0,29	0,20	—	0,063	0,060	0,056	—	0,027	—	—	0,032
O_2^+	0,55	0,21	0,067	0,015	0,032	—	—	—	0,26	—	0,063	0,058	—	0,060	—	0,035	0,027	—	0,048
Li^+	0,63	0,25	0,12	0,096	0,072	0,021	0,018	—	0,32	0,25	0,102	0,105	—	0,098	—	0,066	0,054	—	0,082
Na^+	0,56	0,205	0,078	0,057	0,042	0,012	0,011	—	0,32	0,23	0,073	0,071	—	0,066	—	0,04	0,031	0,067	0,057

Продолжение табл. 20.2

Ион	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rb	Cs	Hg	H_2	D_2	N_2	O_2	NO	CO	SF_6	Cl_2	Br_2	CH_4	CO_2
K^+	0,53	0,187	0,069	0,048	0,034	0,010	0,0086	—	0,33	0,24	0,065	0,069	0,058	0,059	—	0,033	0,025	0,066	0,037
Rb^+	0,52	0,169	0,058	0,038	0,026	0,0097 (621)	0,0066	—	0,33	—	0,058	0,062	—	0,05	—	0,027	0,019	—	0,032
Cs^+	0,48	0,153	0,054	0,034	0,023	0,0073	0,0065 (628)	—	0,33	—	0,057	0,057	—	0,052	—	0,025	0,016	—	0,029
U^+	0,41	—	—	—	—	0,0067	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,023	0,014	—	—
SF_6^-	0,24	—	—	—	—	—	0,0057	—	—	—	—	0,052	—	—	0,014	—	—	0,056	—
SF_5^-	0,28	—	—	—	—	—	0,0059	—	—	—	—	0,057	—	—	0,015	—	—	0,056	—
Ar_2^+	0,37	0,12	0,0475	0,031	0,023	—	—	—	0,26	—	0,054	0,054	—	0,051	—	0,027	0,019	0,061	—
H_2O^+	0,53	0,20	0,069	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,044	0,035	0,077	—
H_3O^+	0,55	0,18	0,087 (337)	—	—	—	—	—	0,33	—	0,071	—	—	—	—	0,043	0,034	0,076	—
$H_5O_2^+$	0,45	0,16	0,073 (337)	—	—	—	—	—	—	—	0,079	—	—	—	—	0,038	0,026	0,067	—
$H_7O_3^+$	0,36	0,15	0,064 (337)	—	—	—	—	—	—	—	0,055	—	—	—	—	0,030	0,022	0,063	—
$H_9O_4^+$	—	0,14	0,058 (337)	—	—	—	0,0076	—	—	—	—	—	—	—	—	0,028	0,020	0,062	—
ReO_3^-	—	0,13	0,05	—	—	—	0,0051	—	—	—	—	—	—	—	—	0,028	0,014	0,058	—
ReO_4^-	—	0,13	0,043	—	—	—	0,0051	—	—	—	—	—	—	—	—	0,024	0,014	0,058	—
WO_3^-	—	0,13	0,051	—	—	—	0,0054	—	—	—	—	—	—	—	—	0,027	0,014	0,058	—
NO^+	0,54	0,15	0,061	0,046	0,033	—	—	—	0,26	—	0,065	0,067	0,049	0,062	—	—	—	—	0,048
CO^+	0,51	—	0,069	0,050	0,037	—	—	—	—	—	—	—	—	0,045	—	—	—	—	—
$N_2O_2^+$	—	—	0,057	0,038	0,028	—	—	—	—	—	—	—	0,046	—	—	—	—	—	—
$C_2O_2^+$	—	—	0,062	0,039	0,028	—	—	—	—	—	—	—	—	0,046	—	—	—	—	—
C^+	—	—	0,092	0,070	0,054	—	—	—	—	—	—	—	—	0,070	—	—	—	—	—
$(SF_6)_2^-$	—	—	0,047	0,028	0,019	—	0,0056	—	—	—	—	—	—	—	0,012	—	—	—	—
$(SF_6)_3^-$	—	—	0,046	0,027	0,018	—	0,0047	—	—	—	—	—	—	—	0,011	—	—	—	—
He_3^+	0,12 (77)	—	0,092	0,039	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cl_2^-	—	—	0,055	0,037	0,026	—	0,0070	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Br_2^-	—	—	0,049	0,031	0,021	—	0,0055	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Br^-	0,49	—	0,058	0,035	0,025	—	0,0067	—	—	—	—	—	—	—	—	0,083	—	—	—

Продолжение табл. 20.2

Ион	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rb	Cs	Hg	H_2	D_2	N_2	O_2	NO	CO	SF_6	Cl_2	Br_2	CH_4	CO_2
N_2O^+	0,47	0,18	0,056	0,044	0,032	—	—	—	—	—	0,069	—	—	—	—	—	0,050	—	—
NO_2^+	0,47	—	0,058	0,043	0,030	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SO_2^+	0,44	—	0,049	0,038	0,027	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ArH^+	0,50	—	0,062	0,043	0,032	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
COH^+	0,52	—	0,064	0,049	0,036	—	—	—	—	—	0,069	—	—	—	—	—	—	—	—
O_2H^+	0,50	—	0,066	0,047	0,035	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CO_2^+	0,51	0,17	0,055	0,042	0,031	—	—	—	—	—	0,056	—	—	—	—	—	—	—	—
NH_3^+	0,60	—	0,81	0,060	0,046	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NH_4^+	0,57	—	0,80	0,059	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Ион	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rb	Cs	Hg	H_2	D_2
N_2OH^+	0,44	0,15	0,052	—	0,031	—	—	—	—	—
$O_2H_2^+$	0,47	0,16	0,065	—	0,034	—	—	—	—	—
$NO_2 \cdot H_2O^+$	0,43	0,14	0,056	—	0,027	—	—	—	—	—
CH_5^+	0,55	0,19	0,081	—	0,046	—	—	—	—	—
$CH_3O_2^+$	0,44	0,15	0,055	—	0,030	—	—	—	—	—
Cl^-	0,52	0,21	0,073	0,048	0,035	0,011	0,0090	0,029	0,30	0,21
OH^-	0,66	0,19	—	—	0,046	0,014	0,012	0,040	0,30	0,22
NO_2^-	0,49	0,15	—	—	0,035	0,0095	0,081	0,026	0,29	0,21
SO_2F^-	0,39	0,14	—	—	0,025	0,0081	0,066	0,021	0,29	0,20
$C_2H_2^-$	0,45	0,17	—	—	0,038	0,012	0,010	0,031	0,30	0,21
SO_3^-	0,40	0,14	—	—	0,026	0,0082	0,0067	0,021	0,29	0,20
HeH^+	0,61	0,28	—	—	0,081	0,024	0,022	—	0,34	0,27
F^-	0,76	0,18	0,086	0,060	0,043	0,013	0,012	0,038	0,30	0,22
I^-	0,42	0,14	0,059	—	0,022	0,0074	0,0059	0,018	0,29	0,20
N_2H^+	—	0,16	—	—	0,037	0,011	—	—	0,30	0,21

20.2. ВЯЗКОСТЬ СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ

Вязкость слабоионизованной плазмы, состоящей из нейтральных частиц, электронов и положительных ионов, может отличаться от вязкости нейтрального газа. При этом электроны, имеющие малую массу, практически ни при каких условиях не вносят заметного вклада в перенос импульса и их ролью в вязкости плазмы можно пренебречь. Вклад ионов в вязкость становится существенным уже при малой степени ионизации, поскольку сечение обмена импульсом, происходящего при столкновениях иона с атомом и обусловленного процессом резонансной перезарядки иона на атоме, существенно превышает сечение передачи импульса при соударениях атомов. Согласно элементарной кинетической теории зависимость вязкости плазмы η от ее параметров дается следующим выражением

$$\eta \sim \frac{\sqrt{TM}}{\sigma_{упр} + \sigma_{рез} N_i/N_a},$$

где T — температура плазмы; M — масса атома; $\sigma_{упр}$ — сечение упругого рассеяния при столкновении атомов, приводящего к передаче импульса; $\sigma_{рез}$ — сечение резонансной перезарядки иона на атоме; N_i, N_a — плотность ионов и атомов соответственно. В равновесной плазме отношение N_i/N_a является функцией давления и температуры плазмы, что и определяет зависимость вязкости плазмы от ее параметров.

При малых степенях ионизации плазмы, когда вкладом ионов в вязкость можно пренебречь, вязкость плазмы растет с ростом температуры. Поскольку обычно $\sigma_{рез} \gg \sigma_{упр}$, при $N_i/N_a \sim \sigma_{упр}/\sigma_{рез} \ll 1$ зависимость вязкости от температуры имеет максимум. В табл. 20.3 приведены максимальные значения вязкости для равновесной плазмы инертных газов. В табл. 20.4—20.7, рис. 20. 1 приводятся значения вязкости равновесной плазмы инертных газов, воздуха и Cs при различных давлении и температуре [8—11]. Погрешность приводимых данных 10—30%.

Таблица 20.3. **Максимальные значения вязкости плазмы инертного газа η_{max} и соответствующей температуры T_{max} [8, 9]**

Газ	p, Па	T_{max}, К	N_i/N_a	η_{max}, Па·с
Ar	10^4	7800	0,069	$3{,}0\cdot10^{-4}$
	10^5	8600	0,058	$3{,}4\cdot10^{-4}$
	10^6	10 200	0,048	$3{,}9\cdot10^{-4}$
Kr	10^5	10 000	0,060	$3{,}3\cdot10^{-4}$
Xe	10^5	9000	0,067	$3{,}4\cdot10^{-4}$

Таблица 20.4. **Вязкость плазмы гелия и аргона при атмосферном давлении и различной температуре [8, 9], 10^{-4} Па·с**

T, 10^3 К	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
He	0,72	—	1,3	1,6	1,8	2,1	2,4	2,9	2,9	3,2	3,3
Ar	0,82	1,1	1,3	1,6	1,9	2,1	2,4	2,7	2,9	3,0	—

Таблица 20.5. **Вязкость плазмы ксеяона при различных давлении и температуре [8, 9], 10^{-4} Па·с**

p, Па	Температура, К				
	6000	7000	8000	9000	1000
10^4	2,6	2,9	3,0	2,7	1,7
10^5	2,6	3,0	3,3	3,4	3,2
10^6	2,6	3,0	3,3	3,6	3,9

Таблица 20.6. **Вязкость плазмы воздуха при атмосферном давлении и различной температуре [10]**

T, 10^3 К	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
η, 10^{-4} Па·с	0,7	1,2	1,8	2,4	2,8	2,1	1,2	0,6	0,3	0,1

Таблица 20.7. **Вязкость частично ионизованного пара Cs при различных давлении и температуре [11]**

T, 10^3 К	Давление, Па						
	1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
2	317	386	406	413	412	412	418
3	6,85	3,88	398	480	561	583	592
4	3,34	6,64	19,6	49,5	224	488	663
5	5,58	7,93	11,7	18,8	66,8	226	482
7	11,6	15,0	19,4	25,4	37,7	80,5	221
10	26,0	31,4	38,2	48,1	63,2	91,0	188

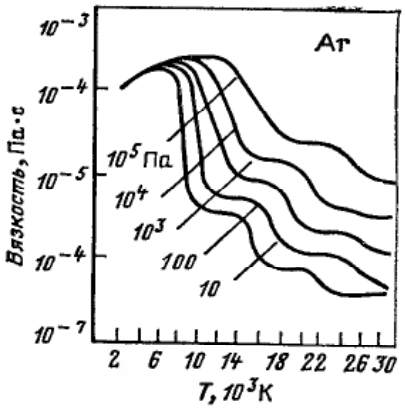


Рис. 20.1. Вязкость равновесного частично ионизованного аргона при различных давлении и температуре

20.3. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА

Перенос тепла в ионизованном газе осуществляется как за счет нейтральных, так и заряженных частиц. При этом в слабоионизованном газе вклад положительных ионов в теплопроводность относительно невелик, поскольку значения энергии, переносимой ионом и нейтральным атомом, сопоставимы, а доля ионов относительно мала. Электроны, скорость которых значительно превышает скорость тяжелых частиц, вносят заметный вклад в теплопроводность плазмы уже при малых степенях ионизации $N_e/N_a \gtrsim \sqrt{m/M}$ (m — масса электрона; M — масса атома, иона). При этом, поскольку обмен энергией электронов с атомами мал ($\sim m/M$), вклады в теплопроводность нейтральных частиц и электронов аддитивны. Наряду с этим определенный вклад в теплопроводность равновесного ионизованного газа вносит процесс установления ионизационного равновесия $A \rightleftarrows A^+ + e$,

Атомы переходят в область с более высокой температурой и там ионизуются, перенося таким образом энергию, равную потенциалу ионизации. Наоборот, заряженные частицы, переходя из более нагретой области в менее нагретую, рекомбинируют там, также перенося такую же энергию в том же направлении. Таким образом, коэффициент теплопроводности слабоионизованной равновесной плазмы $\varkappa$ представляется в виде

$$\varkappa = \varkappa_a + \varkappa_e + \varkappa_{\text{int}},$$

где $\varkappa_a$, $\varkappa_e$, $\varkappa_{\text{int}}$ — вклады в теплопроводность, обусловленные нейтральными частицами, электронами и переносом энергии ионизации соответственно. Вклад последнего слагаемого в теплопроводность максимален при $N_e/N_a \sim \sqrt{m/M}$ и в этих условиях достигает 30%. Поскольку равновесная степень ионизации газа зависит не только от температуры, но и от давления, теплопроводность ионизованного газа также существенно зависит от этих двух параметров. Погрешность приводимых в табл. 20.8 данных составляет ~10%. В табл. 2.9 представлены данные о теплопроводности плазмы воздуха.

Таблица 20.8. **Теплопроводность плазмы инертных газов при атмосферном давлении и различной температуре, 10^{-2} Вт/(см·К)** [8]

Газ	Температура, 10^4 К								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
He	0,51	0,66	1,0	1,2	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3
Ne	0,17	0,22	0,29	0,32	0,35	0,4	0,45	0,54	0,63
Ar	0,055	0,08	0,1	0,12	0,14	0,17	0,23	0,37	0,84
Kr	0,032	0,045	0,052	0,07	0,09	0,12	0,19	0,40	0,89
Xe	0,024	0,030	0,038	0,05	0,06	0,08	0,14	0,40	1,1

Таблица 20.9. **Теплопроводность плазмы воздуха при атмосферном давлении и различной температуре 10^{-2} Вт/(см·К)** [10]

T, 10^3 К	$\varkappa$	T, 10^3 К	$\varkappa$	T, 10^3 К	$\varkappa$	T, 10^3 К	$\varkappa$
2	0,12	7	3,42	12	2,57	17	2,95
3	0,51	8	1,75	13	3,35	18	2,44
4	0,74	9	1,38	14	3,94	19	2,21
5	0,77	10	1,44	15	4,0		
6	2,07	11	2,0	16	3,46		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бычков В. Л., Елецкий А. В., Смирнов Б. М.** Химия плазмы/Под ред. Б. М. Смирнова. Вып. 10. М.: Энергоатомиздат. 1983.
2. **Gallagher J. a. e.**//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1983. Vol. 12. P. 109—161.
3. **Смирнов Б. М.** Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат. 1974.
4. **Мак-Даниель И., Мэзон Э.** Подвижность и диффузия ионов в газах: Пер. с англ. М.: Мир. 1976.
5. **Linuma K. e. a.**//J. Chem. Phys. 1983. Vol. 79. P. 3893—3904.
6. **Lamm D. R. e. a.**//Ibid. P. 1965—1973.
7. **Bohringer H., Durup-Ferguson M., Fahey D. W.**// J. Chem. Phys. 1983. Vol. 79. P. 1974—1981.
8. **Елецкий А. В., Палкина Л. А., Смирнов Б. М.** Явления переноса в слабоионизованном газе. М.: Атомиздат. 1975.
9. **Палкина Л. А., Смирнов Б. М.**/Теплофизика высоких температур. 1974. Т. 12. С. 3—10.
10. **Ролин Н. М.**/Инж.-физ. журн. 1978. Т. 34. С. 444—454.
11. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1972.

Глава 21
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В. С. Егоров, И. Н. Хлюстиков

21.1. ВВЕДЕНИЕ

К металлам относятся вещества, в которых при абсолютном нуле имеется одна или несколько не полностью заполненных электронами энергетических зон. Поверхность в конфигурационном (импульсном) пространстве, разграничивающая занятые и пустые состояния, носит название поверхности Ферми (ПФ). Наличием ПФ металлы отличаются от всех прочих веществ, а ее формой — друг от друга.

Сопротивление металлов электрическому току связано с процессами рассеяния электронов проводимости. Выражение для удельного сопротивления ρ имеет вид

$$\rho = \frac{m}{Ne^2\tau} = \frac{mv_\Phi}{Ne^2 l}, \qquad (21.1)$$

где m, e — масса и заряд электрона; N — эффективная плотность электронов; v_Φ — скорость электрона на поверхности Ферми; τ — среднее время жизни электрона между двумя актами рассеяния; l — соответствующая средняя длина пробега.

Существуют два основных механизма рассеяния: 1) столкновение электронов с локальными неподвижными центрами — примесями, дефектами и пр.; 2) рассеяние тепловыми колебаниями решетки — фононами.

В меру независимости этих процессов эффективная частота соударений равна сумме частот соударений первого и второго процессов, т. е. $1/\tau_{\text{эф}} = 1/\tau_{\text{прим}} + 1/\tau_{\text{фон}}$. Это приводит к правилу Матиссена

$$\rho_{\text{полн}} = \rho_{\text{ост}} + \rho_{\text{вид}}(T), \qquad (21.2)$$

где $\rho_{\text{ост}}$ — не зависящее от температуры T остаточное сопротивление, связанное с технологией данного образца металла и тем меньшее, чем совершеннее образец; $\rho_{\text{вид}}(T)$ — сопротивление идеальной решетки данного металла, обусловленное рассеянием на фононах и сильно зависящее от температуры, которое описывается форму-

лой Блоха—Грюнайзена:

$$\rho_{\text{ид}} = \frac{KT^5}{M\theta^6} \int_0^{\theta/T} \frac{\xi d\xi}{\left(e^{\xi} - 1\right)\left(1 - e^{-\xi}\right)}, \qquad (21.3)$$

где K — постоянная, связанная с удельным объемом металла; M — атомная масса; θ — характеристическая температура Дебая — параметр металла, характеризующий максимальную частоту колебаний решетки ($\hbar\omega_{\max} \cong k\theta$). Для высоких температур $T/\theta \geqslant 1$

$$\rho = KT/4M\theta^2, \qquad (21.4)$$

т. е. сопротивление растет с увеличением температуры линейно; для низких температур $T/\theta \ll 1$

$$\rho = 124{,}4\, KT^5/M\theta^6. \qquad (21.5)$$

Для металлов с ПФ, близкой к сферической, закон $\rho \propto T^5$ начинает выполняться при $T \leqslant 0{,}1\theta$. Для металлов со сложной ПФ этот закон начинает выполняться при гораздо более низких температурах, когда значение импульса тепловых фононов становится меньше всех характерных размеров поверхности Ферми. (Так, для висмута $T \leqslant 0{,}1$ К).

Наличие некоторых примесей может заметно влиять на $\rho_{\text{ид}}(T)$, это является причиной отклонения от правила Матиссена.

Рассеяние на магнитных примесях приводит к логарифмически возрастающей с уменьшением температуры добавке к сопротивлению — эффекту Кондо, что используется в термометрии. Некоторые металлы при низких температурах переходят в сверхпроводящее состояние. Минимально возможная длина пробега (порядка межатомных расстояний) определяет максимальное металлическое удельное сопротивление $\rho_{\max}^{\text{мет}} \sim a\hbar^2/e^2 \simeq 0{,}2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см (a — межатомное расстояние).

В этой главе значительное место уделено металлам и сплавам, находящим разнообразное применение в технике. В связи с этим приведены также характеристики некоторых неэлектрических свойств этих материалов, связанные с их электротехническим применением.

21.2. ЧИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ

Значения удельного сопротивления ρ_0, 10^{-6} Ом·см, и температурного коэффициента сопротивления $\alpha_0 = 1/\rho_0(d\rho/dT)$, 10^{-5} °С, при 0 °С представлены в табл. 21.1 [1]. В четвертом столбце приведены значения характеристической температуры θ, полученные из измерений теплоемкости [2]. Из выражения (21.3) следует, что для любого металла приведенное сопротивление $r \equiv \rho_T/\rho_0$ должно быть универсальной функцией приведенной температуры T/θ:

$$r_T = 1{,}056\,(T/\theta)\,F(\theta/T). \qquad (21.6)$$

Пользуясь табл. 21.1, можно получить значения удельного сопротивления в широком диапазоне температур

$$\rho_T = \rho_0\, r_T / r_0, \qquad (21.7)$$

где ρ_0 и r_0 — значения удельного и приведенного сопротивлений при 0 °С, а значения функции $F(\theta/T)$ даны в табл. 21.2 [3]. В табл. 21.3 [4, 5] приведено удельное сопротивление анизотропных монокристаллов вдоль и поперек главной оси. Данные для графита [6—8] соответствуют как монокристаллам природного происхождения графита-1, так и искусственно выращенным монокристаллам пиролитического графита-2. В табл. 21.4 [9] приведены соотношения между сопротивлением и длиной про-

Таблица 21.1. Удельное сопротивление ρ_0, температурный коэффициент α_0 при 0 °С и характеристическая температура θ чистых металлов [1,2]

Металл	ρ_0, 10^{-6} Ом·см	α_0, 10^{-5} К$^{-1}$	θ, К
Алюминий	2,50	460	433
Барий	36	649	111
Бериллий	3,2	900	1481
Ванадий	18,2	390	398
Висмут	110,0	454	120
Вольфрам	4,89	510	383
Гадолиний	140	176	182
Галлий	40	369	325
Гафний	30	440	252
Гольмий	87	171	190
Диспрозий	56	119	183
Железо	8,6	651	477
Золото	2,06	402	162
Индий	8,19	490	112
Иридий	4,93	411	420
Иттербий	30	130	118
Кадмий	7,07	462	210
Калий	6,1	673	91
Кальций	4,06	417	229
Кобальт	5,57	604	460
Лантан	57,6	213	150
Литий	8,55	489	344
Лютеций	79	240	183
Магний	4,31	412	403
α-Марганец	278	50	409
β-Марганец	91	136	—
γ-Марганец	39,2	628	—
Медь	1,55	433	347
Молибден	5,03	473	423
Мышьяк	26	475	282
Натрий	4,28	546	156
Неодим	71	200	163
Никель	6,14	692	477
Ниобий	16,1	343	276
Олово	11,15	465	199
Осмий	9,5	420	467
Палладий	9,77	377	271
Платина	9,81	396	237
Полоний	42	460	—
Празеодим	65,8	171	152
Рений	18,9	455	416
Родий	4,35	462	512
Ртуть	94,07	99	72
Рубидий	11,29	637	56
Рутений	7,16	458	555
Самарий	88	148	169
Свинец	19,2	428	105
Серебро	1,49	430	227
Стронций	30,3	383	147
Сурьма	39,0	511	220
Таллий	16,2	517	78
Тантал	12,4	382	245
Титан	42	546	420
Торий	13	275	160
Тулий	79	195	200
Уран	21	282	248
Хром	14,1	301	606
Цезий	18,1	503	40
Церий	72,7	97	179
Цинк	5,65	417	328
Цирконий	41	440	290
Эрбий	107	252	188

Таблица 21.2. **Значения функции $F(\theta/T)$ при различных θ/T** [3]

θ/T	$F(\theta/T)$	θ/T	$F(\theta/T)$
0	1,0000	6,3	0,1942
0,1	0,9994	6,4	0,1867
0,2	0,9978	6,5	0,1795
0,3	0,9950	6,6	0,1725
0,4	0,9912	6,7	0,1658
0,5	0,9862	6,8	0,1593
0,6	0,9803	6,9	0,1531
0,7	0,9733	7,0	0,1471
0,8	0,9653	7,1	0,1414
0,9	0,9563	7,2	0,1359
1,0	0,9465	7,3	0,1306
1,1	0,9357	7,4	0,1255
1,2	0,9241	7,5	0,1206
1,3	0,9118	7,6	0,11599
1,4	0,8986	7,7	0,11150
1,5	0,8848	7,8	0,10719
1,6	0,8704	7,9	0,10306
1,7	0,8554	8,0	0,09909
1,8	0,8398	8,1	0,09529
1,9	0,8238	8,2	0,09165
2,0	0,8073	8,3	0,08816
2,1	0,7905	8,4	0,08480
2,2	0,7733	8,5	0,08159
2,3	0,7559	8,6	0,07851
2,4	0,7383	8,7	0,07555
2,5	0,7205	8,8	0,07272
2,6	0,7026	8,9	0,07000
2,7	0,6846	9,0	0,06740
2,8	0,6666	9,1	0,06490
2,9	0,6486	9,2	0,06250
3,0	0,6307	9,3	0,06021
3,1	0,6128	9,4	0,05800
3,2	0,5950	9,5	0,05589
3,3	0,5775	9,6	0,05386
3,4	0,5600	9,7	0,05192
3,5	0,5428	9,8	0,05005
3,6	0,5259	9,9	0,04826
3,7	0,5091	10,0	0,04655
3,8	0,4927	10,1	0,04490
3,9	0,4766	10,2	0,04332
4,0	0,4608	10,3	0,04181
4,1	0,4453	10,4	0,04035
4,2	0,4301	10,5	0,03896
4,3	0,4153	10,6	0,03762
4,4	0,4008	10,7	0,03633
4,5	0,3867	10,8	0,03509
4,6	0,3729	10,9	0,03390
4,7	0,3595	11,0	0,03276
4,8	0,3466	11,1	0,03167
4,9	0,3340	11,2	0,03061
5,0	0,3217	11,3	0,02960
5,1	0,3098	11,4	0,02863
5,2	0,2983	11,5	0,02769
5,3	0,2871	11,6	0,02680
5,4	0,2763	11,7	0,02593
5,5	0,2658	11,8	0,02510
5,6	0,2557	11,9	0,02430
5,7	0,2460	12,0	0,02353
5,8	0,2366	12,1	0,02279
5,9	0,2275	12,2	0,02208
6,0	0,2187	12,3	0,02139
6,1	0,2103	12,4	0,02073
6,2	0,2021	12,5	0,02009

Продолжение табл. 21.2

θ/T	$F(\theta/T)$	θ/T	$F(\theta/T)$
12,6	0,01948	17,6	$0,0_25185$
12,7	0,01889	17,8	$0,0_24956$
12,8	0,01832	18,0	$0,0_24740$
12,9	0,01777	19,0	$0,0_23819$
13,0	0,01725	20,0	$0,0_23111$
13,2	0,01624	22	$0,0_22125$
13,4	0,01531	24	$0,0_21500$
13,6	0,01445	26	$0,0_21089$
13,8	0,01364	28	$0,0_38097$
14,0	0,01289	30	$0,0_36145$
14,2	0,012185	32	$0,0_34747$
14,4	0,011528	34	$0,0_33724$
14,6	0,010915	36	$0,0_32963$
14,8	0,010344	38	$0,0_32387$
15,0	0,029805	40	$0,0_31944$
15,2	$0,0_29302$	44	$0,0_31328$
15,4	$0,0_28831$	48	$0,0_49375$
15,6	$0,0_28389$	50	$0,0_47964$
15,8	$0,0_27974$	52	$0,0_46806$
16,0	$0,0_27584$	56	$0,0_45061$
16,2	$0,0_27218$	60	$0,0_43841$
16,4	$0,0_26873$	64	$0,0_42967$
16,6	$0,0_26549$	68	$0,0_42328$
16,8	$0,0_26243$	70	$0,0_42073$
17,0	$0,0_25955$	72	$0,0_41852$
17,2	$0,0_25683$	76	$0,0_41492$
17,4	$0,0_25427$	80	$0,0_41215$

волок в диапазоне значений диаметра от 0,05 до 4,0 мм и удельного сопротивления материала от $0{,}016 \cdot 10^{-4}$ до $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ Ом·см.

Жидкие металлы. При плавлении сопротивление большинства металлов увеличивается. У металлов, объем которых уменьшается при плавлении (висмут, сурьма, галлий), сопротивление уменьшается (табл. 21.5, 21.6, рис. 21.1, 21.2).

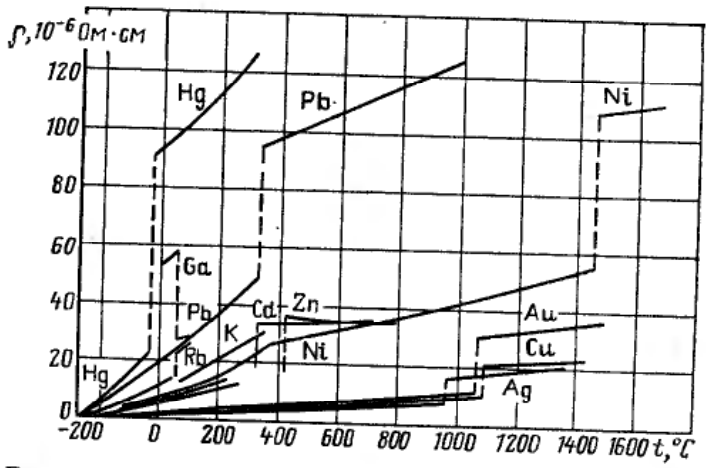


Рис. 21.1. Изменение сопротивления с температурой некоторых металлов в твердом и жидком состояниях [9]

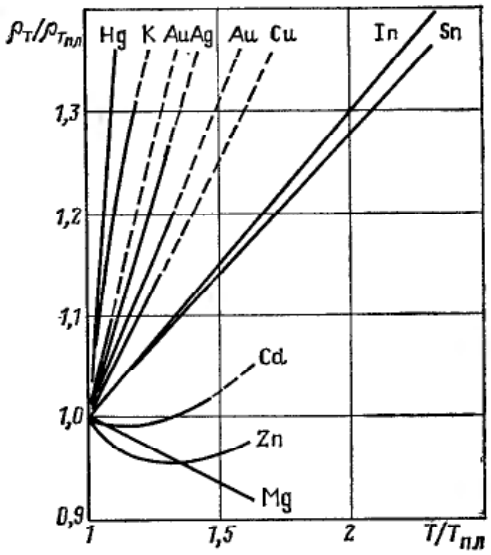


Рис. 21.2. Зависимость относительного удельного сопротивления различных жидких металлов $\rho_T/\rho_{T_{пл}}$ от $T/T_{пл}$ [4] пунктир — экстраполяция)

21.3. ВЛИЯНИЕ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Сопротивление металлов, как правило, уменьшается при приложении к ним внешнего гидростатического давления P. Зависимость $R(P)$ некоторых металлов может быть не монотонной, на ней имеют место изломы и скачки, обусловленные фазовыми превращениями, что используется в физике высокнх давлений в качестве реперных точек. В табл. 21.7 дается относнтельное изменение сопротивления (но не удельного сопротивления, для которого необходимо учитывать изменения размеров) с обратным знаком в диапазоне $0<P\leqslant 10$ ГПа. Все даиные соответствуют измерениям прн температуре 25—30° С [1].

Таблица 21.4. **Сопротивление и длина проволок диаметром от 0,05 до 4,0 мм**

Диаметр, мм	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020	0,025	0,027	0,030	0,04	0,05	0,06
							Сопротивление проволоки длиной 1 м, Ом				
0,05	8,15	8,66	9,17	9,68	10,19	12,73	13,75	15,3	20,4	25,5	30,6
0,10	2,04	2,16	2,29	2,42	2,55	3,18	3,44	3,8	5,1	6,4	7,6
0,15	0,91	0,96	1,02	1,07	1,13	1,41	1,53	1,70	2,26	2,83	3,4
0,20	0,51	0,54	0,57	0,60	0,64	0,80	0.859	0,95	1,27	1,59	1,91
0,25	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,51	0,550	0,61	0,81	1,02	1,22
0,30	0,226	0,240	0,255	0,269	0,283	0,354	0,382	0,424	0,566	0,707	0,849
0,40	0,127	0,135	0,143	0,151	0,159	0,199	0,215	0,239	0,318	0,398	0,477
0,50	0,081	0,087	0,092	0,097	0,102	0,127	0,138	0,153	0,204	0,255	0,306
0,60	0,057	0,060	0,064	0,067	0,071	0,088	0,0955	0,106	0,141	0,177	0,212
0,70	0,042	0,044	0,047	0,049	0,052	0,065	0,0702	0,078	0,104	0,130	0,156
0,80	0,0318	0,0338	0,0358	0,0378	0,0398	0,0497	0,0537	0,060	0,080	0,099	0,119
1,00	0,0204	0,0216	0,0229	0,0242	0,0255	0,0318	0,0344	0,038	0,051	0,064	0,070
1,2	0,0142	0,0150	0,0159	0,0168	0,0177	0,0221	0,0239	0,0265	0,0354	0,0442	0,053
1,4	0,0104	0,0110	0,0117	0,0123	0,0130	0,0162	0,0175	0,0195	0,0260	0,0325	0,039
1,6	0,0080	0,0085	0,0090	0,0095	0,0099	0,0124	0,0134	0,0149	0,0199	0,0249	0,0298
2,0	0,0051	0,0054	0,0057	0,0060	0,0064	0,0080	0,00859	0,0095	0,0127	0,0159	0,0191
2,5	0,00326	0,00346	0,00367	0,00387	0,00407	0,0051	0,00550	0,0061	0,0081	0,0102	0,0122
3,0	0,00226	0,00240	0,00255	0,00269	0,00283	0,0035	0,00382	0,0042	0,0057	0,0071	0,0085
3,5	0,00166	0,00177	0,00187	0,00197	0,00208	0,00260	0,00281	0,00312	0,00416	0,0052	0,0062
4,0	0,00127	0,00135	0,00143	0,00151	0,00159	0,00199	0.00215	0,00239	0,00318	0,0040	0,0048
							Длина проволоки сопротивлением 1 Ом, м				
0,05	0,123	0,115	0,109	0,103	0,098	0,079	0,073	0,065	0,049	0,039	0,0327
0,10	0,49	0,46	0,44	0,41	0,39	0,314	0,291	0,262	0,196	0,157	0,131
0,15	1,11	1,04	0,98	0,93	0,88	0,71	0,655	0,59	0,44	0,35	0,295
0,20	1,96	1,85	1,75	1,65	1,57	1,26	1,16	1,05	0,79	0,63	0,52
0,25	3,07	2,89	2,73	2,58	2,45	1,96	1,82	1,64	1,23	0,98	0,82
0,30	4,4	4,2	3,9	3,7	3,5	2,83	2,62	2,36	1,77	1,41	1,18
0,40	7,9	7,4	7,0	6,6	6,3	5,03	4,65	4,19	3,14	2,51	2,09
0,50	12,3	11,5	10,9	10,3	9,8	7,85	7,27	6,54	4,91	3,93	3,27
0,60	27,6	16,6	15,7	14,9	14,1	11,3	10,5	9,4	7,1	5,7	4,7
0,70	24,0	22,6	21,4	20,3	19,2	15,4	14,3	12,8	9,6	7,7	6,4
0,80	31,4	29,6	27,9	26,4	25,1	20,1	18,6	16,8	12,6	10,1	8,4
1,00	49,1	46,2	43,6	41,3	39,3	31,4	29,1	26,2	19,6	15,7	13,1
1,2	71	66	63	59	57	45	41,9	37,7	28,3	22,6	18,8
1,4	96	90	86	81	77	62	57,0	51,3	38,5	30,8	25,7
1,6	126	118	112	106	101	80	74,5	67	50	40	33,5
2,0	196	185	175	165	157	126	116	105	79	63	52,4
2,5	307	289	273	258	245	196	182	164	123	98	82
3,0	442	416	393	372	353	283	262	236	177	141	118
3,5	601	566	535	506	481	385	356	321	241	192	160
4,0	785	739	698	661	628	503	465	419	314	251	209

Таблица 21.3. **Удельное сопротивление для анизотропных металлических кристаллов [4—8]**

Металл	t, °С	Кристаллическая структура	$\rho_{\parallel}$, 10^{-6} Ом·см	$\rho_{\perp}$, 10^{-6} Ом·см	$\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$	Металл	t, °С	Кристаллическая структура	$\rho_{\parallel}$, 10^{-3} Ом·см	$\rho_{\perp}$, 10^{-6} Ом·см	$\rho_{\perp}/\rho_{\parallel}$
Бериллий	0	Гекс.	3,58	3,12	0,88	Кадмий	0	»	7,73	6,35	0,87
Висмут	0	Ромб.	127	99	78	Магний	0	»	3,58	4,22	1,21
Вольфрам	—183	Куб.	0,892 [100]	0,843 [111]	0,945	Мышьяк	0	»	26	23,8	0,92
						Олово	0	Тетр.	9,09	13,08	1,46
Галлий	20	Ромб.	55,5	17,3	0,31	Ртуть	—45.5	Ромб.	17,8	23,5	1,32
Гафний	0	Гекс.	32,7	32.0	0,98	Сурьма	0	»	26,3	36,0	1,37
Графит 1*	20	»	5400	41	$7{,}6\cdot10^{-3}$	Цинк	0	Гекс.	5,59	5,39	0,96
	—195	»	2300	20	$8{,}7\cdot10^{-3}$						
Графит 2*	20	»	$1{,}7\cdot10^{5}$	44,3	$2{,}6\cdot10^{-4}$						
	—195	»	$3\cdot10^{5}$	25,9	$8{,}6\cdot10^{-5}$						

* Графит 1 и графит 2 — природный и искусственный пиролитический.

с удельным сопротивлением от 0,016 до $1{,}40\cdot10^{-4}$ Ом·см [9]

Диаметр, мм	0,07	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,75	0,85	1,00	1,10	1,20	1,40
0,05	36	41	51	76	102	127	153	204	255	306	382	433	509	560	611	713
0,10	8,9	10,2	12,7	19,1	25,5	31,8	38	51	64	76,4	95,5	108	127	140	153	178
0,15	4,0	4,5	5,7	8,5	11,3	14,1	17,0	22,6	28,3	33,9	42,4	48	56,6	62,2	67,9	79,2
0,20	2,23	2,55	3,18	4,8	6,4	8,0	9,5	12,7	15,9	19,1	23,9	27,1	31,8	35,0	38,2	44,6
0,25	1,43	1,63	2,04	3,06	4,1	5,1	6,1	8,1	10,2	12,2	15,3	17,3	20,4	22,4	24,4	28,5
0,30	0,99	1,13	1,41	2,12	2,83	3,54	4,24	5,66	7,07	8,49	10,6	12,0	14,1	15,6	17,0	19,8
0,40	0,56	0,64	0,80	1,19	1,59	1,99	2,39	3,18	3,98	4,78	5,97	6,76	7,96	8,76	9,55	11,1
0,50	0,36	0,41	0,51	0,76	1,02	1,27	1,53	2,04	2,55	3,06	3,82	4,33	5,09	5,60	6,11	7,13
0,60	0,248	0,283	0,354	0,53	0,71	0,88	1,06	1,41	1,77	2,12	2,65	3,00	3,54	3,89	4,24	4,95
0,70	0,182	0,208	0,260	0,39	0,52	0,65	0,78	1,04	1,30	1,56	1,95	2,21	2,60	2,86	3,12	3,64
0,80	0,139	0,159	0,199	0,298	0,398	0,497	0,60	0,80	0,99	1,19	1,49	1,69	1,99	2,19	2,39	2,79
1,00	0,080	0,102	0,127	0,191	0,255	0,318	0,38	0,51	0,64	0,764	0,955	1,08	1,27	1,40	1,53	1,78
1,2	0,062	0,071	0,088	0,133	0,177	0,221	0,265	0,354	0,442	0,531	0,663	0,75	0,884	0,973	1,06	1,24
1,4	0,045	0,052	0,065	0,097	0,130	0,162	0,195	0,260	0,325	0,390	0,487	0,55	0,650	0,715	0,779	0,909
1,6	0,0348	0,0398	0,0497	0,075	0,099	0,124	0,149	0,199	0,249	0,298	0,373	0,423	0,497	0,547	0,597	0,696
2,0	0,0223	0,0255	0,0318	0,048	0,064	0,080	0,095	0,127	0,159	0,191	0,239	0,271	0,318	0,350	0,382	0,446
2,5	0,0143	0,0163	0,0204	0,0305	0,0407	0,051	0,061	0,081	0,102	0,122	0,153	0,173	0,204	0,224	0,244	0,285
3,0	0,0099	0,0113	0,0141	0,0212	0,0283	0,035	0,042	0,057	0,071	0,085	0,106	0,120	0,141	0,156	0,170	0,198
3,5	0,0073	0,0083	0,0104	0,0156	0,0208	0,0260	0,0312	0,0416	0,052	0,062	0,078	0,088	0,104	0,114	0,125	0,146
4,0	0,0056	0,0064	0,0080	0,0119	0,0159	0,0199	0,0239	0,0318	0,040	0,048	0,060	0,068	0,080	0,087	0,095	0,111
0,05	0,0280	0,0245	0,0196	0,0131	0,0098	0,0079	0,0065	0,0049	0,0039	0,0033	0,0026	0,0023	0,0020	0,0018	0,0016	0,0014
0,10	0,112	0,098	0,079	0,052	0,039	0,0314	0,0262	0,0196	0,0157	0,0131	0,0105	0,0092	0,0078	0,0071	0,0065	0,0056
0,15	0,252	0,221	0,177	0,118	0,088	0,071	0,059	0,044	0,035	0,0295	0,00236	0,0208	0,0177	0,0161	0,0147	0,0126
0,20	0,45	0,39	0,314	0,209	0,157	0,126	0,105	0,079	0,063	0,0524	0,0419	0,0370	0,0314	0,0286	0,0262	0,0224
0,25	0,70	0,61	0,49	0,327	0,245	0,196	0,164	0,123	0,098	0,0818	0,0655	0,0578	0,0491	0,0446	0,0409	0,0351
0,30	1,01	0,88	0,71	0,47	0,35	0,283	0,236	0,177	0,141	0,118	0,0943	0,083	0,0707	0,0643	0,0589	0,0505
0,40	1,80	1,57	1,26	0,84	0,63	0,503	0,419	0,314	0,251	0,209	0,168	0,148	0,126	0,114	0,105	0,0898
0,50	2,80	2,45	1,96	1,31	0,98	0,785	0,654	0,491	0,393	0,327	0,262	0,231	0,196	0,179	0,164	0,140
0,60	4,0	3,53	2,83	1,88	1,41	1,13	0,94	0,71	0,57	0,471	0,377	0,332	0,283	0,257	0,236	0,202
0,70	5,5	4,81	3,85	2,57	1,92	1,54	1,28	0,96	0,77	0,641	0,513	0,453	0,385	0,350	0,321	0,275
0,80	7,2	6,3	5,0	3,25	2,51	2,01	1,68	1,26	1,01	0,838	0,670	0,592	0,503	0,457	0,419	0,359
1,00	11,2	9,8	7,9	5,24	3,93	3,14	2,62	1,96	1,57	1,31	1,05	0,924	0,785	0,714	0,655	0,561
1,20	16,2	14,1	11,3	7,5	5,7	4,5	3,77	2,83	2,26	1,89	1,51	1,33	1,13	1,03	0,943	0,808
1,40	22,0	19,2	15,4	10,3	7,7	6,2	5,13	3,85	3,08	2,57	2,05	1,81	1,54	1,40	1,28	1,10
1,60	28,7	25,1	20,1	13,4	10,1	8,0	6,7	5,0	4,0	3,35	2,68	2,37	2,01	1,83	1,68	1,44
2,0	44,9	39,2	31,4	20,9	15,7	12,6	10,5	7,9	6,3	5,24	4,19	3,7	3,14	2,86	2,62	2,24
2,5	70	61	49	32,7	24,5	19,6	16,4	12,3	9,8	8,18	6,55	5,8	4,91	4,46	4,09	3,51
3,0	101	88	71	47,1	35,3	28,3	21,6	17,7	14,1	11,8	9,43	8,3	7,07	6,43	5,89	5,05
3,5	137	120	96	64	48	38,5	32,1	24,1	19,2	16,0	12,8	11,3	9,62	8,75	8,02	6,87
4,0	180	175	126	84	63	50,3	41,9	31,4	25,1	20,9	16,8	14,8	12,6	11,4	10,5	8,98

Таблица 21.5. **Изменение сопротивления и объема некоторых металлов при плавлении [1]**

Продолжение табл. 21.5

Металл	$t_{пл}$, °С	$\rho_ж$, 10^{-6} Ом · см	$\rho_ж/\rho_{тв}$	$\Delta V/V_ж$
Алюминий	660	20,1	1,64	+0,048
Висмут	271	123	0,43	—0,033
Галлий	29,9	25,9	0,58	—0,03
Железо	1535	139	1,09	+0,03
Золото	1063	30,8	2,28	+0,051
Индий	156	—	2,12	—
Кадмий	321	—	1,89	+0,05
Калий	62,5	—	1,56	+0,026
Литий	180	—	1,68	+0,017
Магний	651	27,9	1,63	+0,041
Медь	1083	21,5	2,07	+0,042
Натрий	97,6	—	1,45	+0,027
Олово	327,4	99,3	2,07	+0,035
Ртуть	—38,9	90	3,36	+0,037
Рубидий	38,7	—	1,61	+0,028
Серебро	961	16,4	1,9	+0,038
Сурьма	630	108	0,71	—0,09
Таллий	302	—	2,0	+0,03
Цинк	420	32,6	2,11	+0,042
Цезий	29,7	—	1,66	+0,026

Таблица 21.6. **Удельное сопротивление некоторых жидких металлов ρ, 10^{-6} Ом · см [9]**

°С	K	$K_{56}Na_{44}$	$K_{78}Na_{22}$	Cu	Ni	Sn	Sb	Zn	Cd	Al	Fe	Pb
100	15,49	41,61	45,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—
200	21,8	47,23	51,33	—	—	—	—	—	—	—	—	—
300	28,2	54,33	58,58	—	—	49,4	—	—	—	—	—	—
400	—	62,21	65,65	—	—	51,6	—	—	33,7	—	—	98
500	—	69,37	73,48	—	—	53,9	—	$34,5_5$	34,1	—	—	103
600	—	78,29	82,61	—	—	56,0	—	$35,5_5$	34,8	—	—	107
700	—	88,23	91,76	—	—	58,3	129	$35,6_5$	35,8	27,8	—	112
800	—	99,68	104,51	—	—	60,5	131	$35,7_0$	—	29,3	—	116
900	—	—	—	—	—	62,7	133	$35,7_5$	—	30,8	—	121
1000	—	—	—	—	—	65,0	135	—	—	32,2	—	126
1100	—	—	—	21,5	—	67,2	138	—	—	33,7	—	—
1200	—	—	—	22,4	—	69,5	140	—	—	35,2	—	—
1300	—	—	—	23,3	—	71,7	—	—	—	—	—	—
1400	—	—	—	24,2	—	74,0	—	—	—	—	—	—
1500	—	—	—	25,0	109	76,2	—	—	—	—	—	—
1550	—	—	—	—	110	—	—	—	—	—	133	—
1600	—	—	—	—	110_5	—	—	—	—	—	136	—
1650	—	—	—	—	111_5	—	—	—	—	—	138	—

Таблица 21.7. **Относительное изменение сопротивления чистых металлов $-\Delta R/R_0 = -(R_p - R_0)/R_0$ при всестороннем сжатии, % [1]**

Металл	Давление, 10^8 Па										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Алюминий	2,15	4,06	7,66	10,8	13,5	—	17,6	—	20,6	—	23,0
Барий*1	—24,5	—55,6	—137,7	—246,6	—358	—296	—137	—89	—81,5	—80,5	—81
Бериллий	0,85	1,6	3,1	4,6	5,9	7,1	8,3	9,4	10,4	11,6	12,4
Ванадий	—	1,6	3,1	4,6	5,9	7,1	8,4	9,4	10,5	11,5	12,2
Висмут*2	—6,5	—15,2	—38,3	39,6	43,3	45,4	47,2	48,3	50,2	51,5	52,6
Вольфрам	0,66	1,305	2,554	3,744	4,9	6,0	7,0	8,0	8,9	9,7	10,5
Гадолиний	—	4,6	8,8	19,9	23,6	26,8	29,4	31,6	33,3	34,8	35,9
Галлий*3	2,65	5,31	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Гафний	—	0,87	1,63	2,27	2,79	3,16	3,48	3,74	3,93	4,08	4,19
Гольмий	—	2,2	4,4	6,6	9,0	11,6	13,8	15,7	17,3	18,4	19,2
Диспрозий	—	2,3	4,7	7,0	9,1	10,6	12,0	13,2	15,2	17,1	16,3
Железо	1,2	2,3	4,4	6,4	8,1	19,7	11,2	12,5	13,8	14,9	15,9
Золото	1,5	2,9	5,6	8,1	10,4	12,6	14,5	16,0	17,1	17,9	18,4
Индий	1,7	12,2	21,4	28,3	34,1	39,0	43,5	47,1	50,4	53,5	56,2
Иридий	0,69	1,368	2,694	3,978	5,2	6,4	7,6	8,6	9,6	10,5	11,4
Иттербий	—	—97	—288	—624	—101,3	—11,85	—	21,14	23,04	24,12	24,67
Кадмий	3,95	7,32	12,8	17,16	20,8	23,8	26,4	28,7	30,7	32,5	34,2
Калий	50,9	69,7	81,8	82,2	79,7	74,8	69,1	63,0	56,1	48,6	40.4
Кальций	—7,2	—15,2	—33,4	—56,7	—81,1	—106,9	—134	—161,8	—191,6	—224,4	—265,0
Кобальт	0,465	0,904	1,704	2,397	3,0	3,5	3,9	4,2	4,5	4,7	4,9
Лантан*4	0,9	1,7	3,5	10,6	—	—	—	—	—	—	—
Литий	—3,5	—7,2	—5,2	—23,9	—30,5	—36,6	—42,8	—48,7	—55,1	—12,3	—70,4
Лютеций	—	1,31	2,86	4,75	6,40	7,81	9,03	10,09	10,98	11,75	12,39
Магний	2,29	4,7	8,4	11,4	14,1	16,3	18,3	20,0	21,4	22.4	23,3
Марганец	1,92	3,54	6,08	7,89	9,1	10,0	10,8	11,7	12,8	14,4	15,9
Медь	0,9	1,8	3,5	5,1	6,6	8,0	9,3	10,5	11,6	12,5	13,4
Молибден	0,65	1,289	2,532	3,729	4,9	6,0	7,1	8,1	9,1	10,0	10,8
Мышьяк, $\perp C$	—	6,7	11,8	15,6	18,6	21,1	23,3	25,0	26,6	28,2	30,2
Натрий	24,6	38,2	51,8	58,2	60,8	61,0	60,1	58,8	57,0	54,8	52,1
Неодим	0,9	1,5	3,1	4,0	4,5	4,7	4,7	4,7	4,6	4,3	3,8
Никель*5	0,9	1,824	3,552	5,184	6,7	8,2	9,6	10,8	12,0	13,1	14,2
Ниобий	0,69	1,366	2,662	3,888	5,0	6,2	7,2	8,2	9,1	9,9	10,6
Олово	4,9	9,2	16,5	22,5	27,6	31,7	35,3	38,2	40,8	43,1	45,2
Осмий											
Палладий	1,05	2,10	4,2	6,3	7,5	9,1	10,6	11,9	13,1	14,2	15,3
Платина	0,95	1,879	3,664	5,340	6,9	8,4	9,7	10,9	12.0	13,0	13,9
Полоний											
Празеодим	0,3	0,4	0,4	0,2	—0,1	0,6	6,9	11,1	12,0	11,8	11,0
Рений ($\Delta R/R_{20}$)	—	14	0	—	14,4	—	21,3	—	25,8	—	29,4
Родий	0,819	1,622	3,182	4,680	6,1	7,5	8,8	10,0	11,1	12,0	12,8
Ртуть*6	11,4	20,8	85,0	95,6	112,6	114,6	116,7	118,5	120,1	121,6	122,8
Рубидий	52,9	62,9	62,4	48,4	30,5	7,6	—21,8	—59.4	—97.2	—138	—195
Рутений	1,24	2,48	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Самарий	—	3,6	6,1	8,2	9,5	10,5	11,2	11,8	12,3	12,6	12,8
Свинец	6,8	12,5	21,8	29,2	34,9	39,4	42,7	45,4	47,6	49,5	51,0
Серебро	1,7	3,4	6,4	9,0	11,5	13,6	15,4	16,9	18,1	19,1	19,8
Стронций*7	—24,5	—55,6	—137,7	—246,6	—358	—29	—137	—89	—81,5	—80,5	—81
Сурьма	—	—6,0	—10,4	—10,3	—7,8	—2,1	6,2	16.3	24.4	32,6	39,5
Сурьма, $\approx \perp C(87°)$	—2,6	—4,5	—4,2	—4,7	—	—	—	—	—	—	—

Металл	Давление, 10^8 Па										
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Сурьма (41° от С)	—5,5	—12,6	—25,6	—31,5	—	—	—	—	—	—	—
Таллий*8	6,38	11,80	20,5	27,3	33,5	56,4	60,9	64,8	68,1	71,0	73,5
Тантал	0,811	1,621	3,196	4,650	5,9	7,1	8,2	9,2	10,2	11,0	11,8
Титан	0,575	1,118	2,126	3,051	3,9	4,7	5,5	6,2	6,9	7,6	8,4
Торий	—	3,4	6,3	8,8	10,8	12,4	13,8	15,0	16,0	16,9	17,9
Тулий	—	2,6	4,7	6,4	7,7	8,7	9,6	10,3	11,2	12,1	13,1
Уран	2,355	4,56	8,634	12,31	16,3	18,8	21,0	23,0	24,8	26,3	27,6
Хром*9	12,45	17,33	22,56	26,88	29,9	32,7	35,3	37,6	39,9	42,0	44,2
Цезий*10	18,8	—0,5	—91,7	—320	—496	—790	—832	—655	—555	—488	—433
Церий*11	—2,0	45,2	49,4	51,3	52,3	53,1	53,8	53,7	52,9	51,4	51,8
Цинк	—	6,3	11,3	15,3	18,8	21,7	24,4	26,7	28,7	30,5	32,1
Цинк $\approx \perp$С (87°С)	25	4,8	8,5	11,4	—	—	—	—	—	—	—
Цирконий*12	0,195	0,39	0,78	—	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	—	—
Эрбий	—	2,7	5,0	6,8	8,2	11,0	13,7	15,6	16,8	17,4	17,6

*1 При $8 \cdot 10^9$ Па скачок от 103,2 до 148,5%.
*2 При $24{,}7 \cdot 10^8$ Па скачок от +51,4 до —76,1%, при $2{,}6 \cdot 10^9$ Па о 76,4 до —38,3%.
*3 Для твердого галлия (0 °С) при 10^9 Па $\Delta R/R_0 = -2{,}47\%$.
*4 Увеличение давления. В обратном ходе гистерезис, при $2 \cdot 10^9$, 10^9 и $5 \cdot 10^8$ Па $\Delta R/R_0 = -8{,}4$; —4,4; —1,7%.
*5 При 10^9 Па излом.
*6 При $13{,}59 \cdot 10^8$ Па переход из жидкого состояния в твердое, скачок от —26,2 до 75,3%, при $4 \cdot 10^9$ Па скачок от —101,7 до —112%.
*7 При $4{,}6 \cdot 10^9$ Па максимум +405%.
*8 При $4{,}5 \cdot 10^9$ Па скачок от —36,1 до 54%.
*9 При $3{,}4 \cdot 10^8$ Па излом, $\Delta R/R_0 = 9{,}76\%$.
*10 При $2{,}207 \cdot 10^9$ Па скачок от 120,3 до 143,9%, при $5{,}495 \times 10^9$ Па максимум +102%.
*11 При $7 \cdot 10^8$ Па скачок от +2,7 до —41,8%.
*12 Выше $8 \cdot 10^9$ Па падение сопротивления на 16—17%.

Сплав	Массовое содержание компонентов, %	t_{max}, °С	ρ_{20}, 10^{-8} Ом·см	α_{20}, 10^{-5} K^{-1}
Медь-марганец-алюминий	93Cu, 5Mn, 2Al	400	22	5
	88Cu, 10Mn, 2Al	400	38	—3
Никелин	67Cu, 30Ni, 2—3Mn	300	40	11
Никелин-нейзильбер	58Cu, 22Ni, 20Zn	300	36	31
	54Cu, 26Ni, 20Zn	300	43	23
Нейзильбер	60Cu, 17Ni, 23Zn	300	30	35

21.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Ниже в таблицах и рисунках приводятся данные по сопротивлению металлов, металлов с примесями и сплавов, нашедших практическое применение в электротехнике, приборостроении и других отраслях промышленности.

Таблица 21.8. **Удельное сопротивление ρ и температурный коэффициент α при 20 °С сплавов, употребляемых до температуры t_{max} [1]**

Сплав	Массовое содержание компонентов, %	t_{max}, °С	ρ_{20}, 10^{-8} Ом·см	α_{20}, 10^{-5} K^{-1}
Константан	54Cu, 45Ni, 1Mn	400	50	—3
Манганин	86Cu, 12Mn, 2Ni	300	43	1—2
	85Cu, 15Mn	300	51	0,8
	84Cu, 13Mn, 3Al	400	50	—0,2÷—2
	85Cu, 9,5Mn, 5.5Al	400	45	1—3
Медь-алюминий	95Cu, 5Al	350	11	80
Медь-марганец	91Cu, 9Mn	350	33,4	—0,8
	90,5Cu, 9,5Mn	350	35.2	9,1

Таблица 21.9. **Удельное сопротивление при 20 и 1000 °С сплавов, употребляемых до температуры t_{max} [1]**

Сплав	Массовое содержание компонентов	t_{max}, °С	ρ_{20}, 10^{-8} Ом·см	ρ_{1000}, 10^{-8} Ом·см
Нихром	70—80Ni, 20Cr, 0—2Mn	1150	106	112
	70Ni, 8Fe, 20Cr, 2Mn	1150	110	120
	62Ni, 23Fe, 15Cr	1100	110	119
	63Ni, 20Fe, 15Cr, 2Mn	1150	112	125
	20Ni, 55Fe, 25Cr	1000	97	130
Хромоалюминиевый	65Fe, 30Cr, 5Al	1350	140	142
	72Fe, 20Cr, 5Al, 3Co	1300	145	151
	86Fe, 12Cr, 2Al	1000	110	122

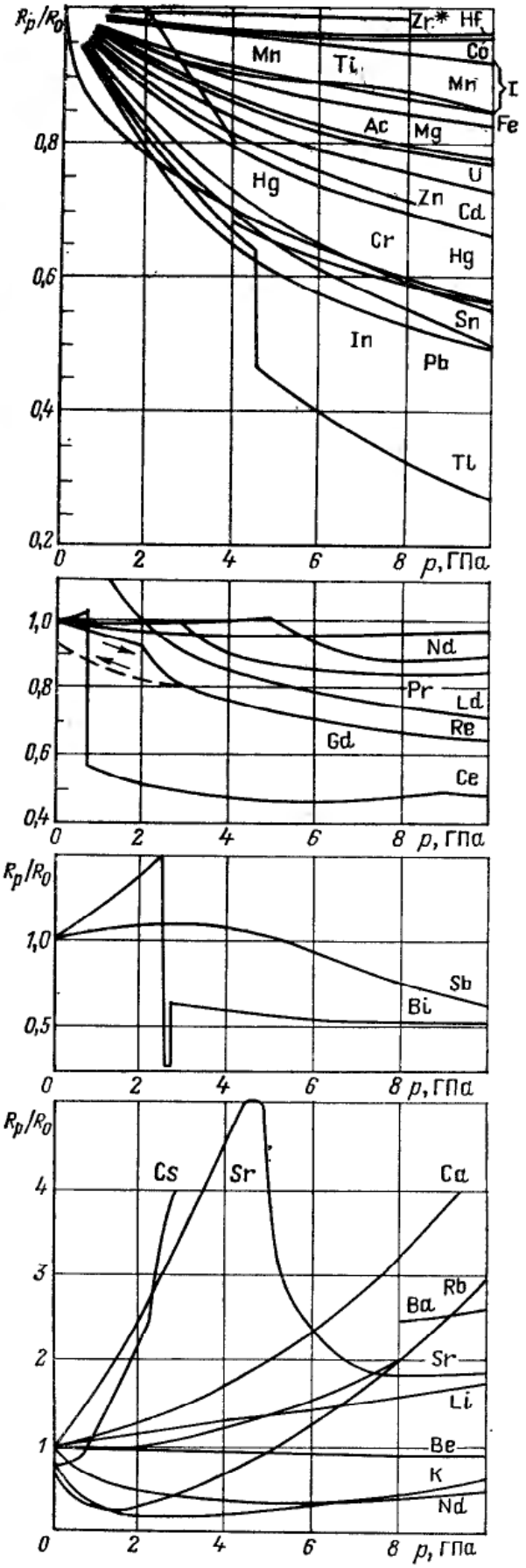


Рис. 21.3. Влияние давления на относительное сопротивление металлов [4]

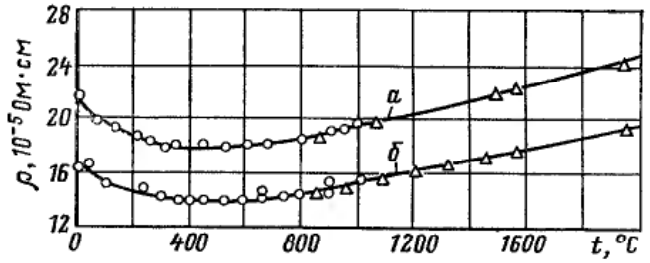


Рис. 21.4. Зависимость удельного сопротивления электродного графита от температуры [10] поперек (*а*) и вдоль (*б*) направления прессования

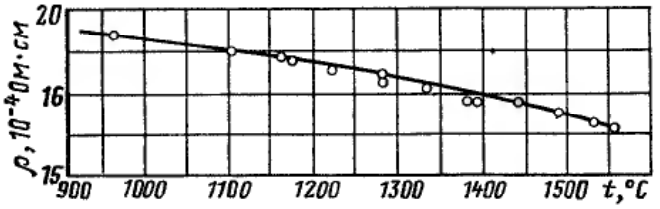


Рис. 21.5. Зависимость удельного сопротивления угольного материала из нефтяного кокса выше температуры отжига от температуры [10]

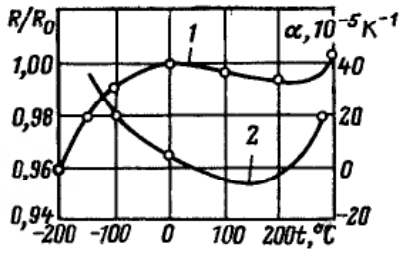


Рис. 21.6. Зависимость относительного сопротивления (*1*) и температурного коэффициента (*2*) манганина от температуры [11]

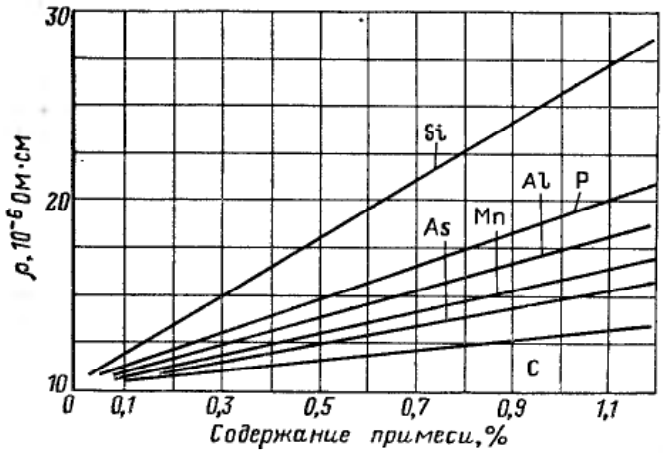


Рис. 21.7. Зависимость удельного сопротивления стали от содержания примесей [11]

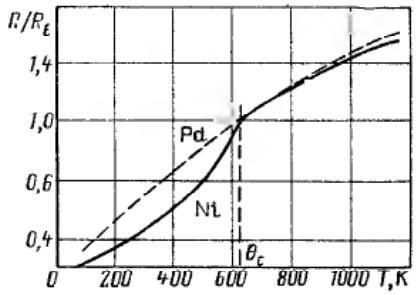


Рис. 21.8. Зависимость относительного сопротивления никеля и палладия от температуры. Сопротивление нормировано на точку Кюри для никеля (631 К) [4]

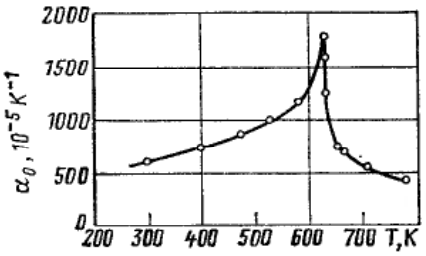


Рис. 21.9. Зависимость температурного коэффициента сопротивления никеля от температуры [4]

Таблица 21.10. **Удельное сопротивление ρ и температуриый коэффициент α при 20 °С некоторых сплавов** [1]

Сплав	Массовое содержание компонентов, %	ρ_{20}, 10^{-6} Ом·см	$10^{-3}\alpha_{20}$, K^{-1}
Алюмель	2Mn, 2Al, 1Si, Ni, остальное Co	305	—
Розе́	48Bi, 28Pb, 24Sn	67	190
Вуда	56Bi, 14Pb, 14Sn, 16Cd	54	230
	64Fe, 36Ni	75	—
	90Fe, 10Al	100	327
	88Fe, 12Mn	55	≈200
	96Fe, 4Si	50	≈90
Копель	44Ni+Co, 0,1—1Mn, остальное Cu	465	—
Монель	67Ni, 28Cu, остальное Fe + Mn	48	≈120
Пермаллой С	70—75Ni, остальное Fe+ +Cu+Cr	55	—
Платиноиридиевый	90Pt, 10Ir	23,6	123
	85Pt, 15Ir	27,4	100
	80Pt, 20Ir	30	80
Платинородиевый	90Pt, 10Rh	21,7	139
Платиносеребряный	33Pt, 67Ag	27	24

Рис. 21.10. Влияние примесей на удельное сопротивление серебра [11]

Таблица 21.11. **Проводимость проводниковых бронз при 20 °С** [11, 12]

Сплав	Состояние	Проводимость, % по отношению к меди
Бронза*:		
кадмиевая (0,9% Cd)	Отожженная	95
	Твердотянутая	83—90
оловянистая (0,8% Cd, 0,6% Sn)	Отожженная	55—60
	Твердотянутая	50—55
алюминиевая (2,5% Al, 2%Sn)	Отожженная	15—18
	Твердотянутая	15—18
бериллиевая (2,25% Be)	Отожженная	17
	Состаренная при 350 °С	30
фосфористая (7% Sn, 0,1% P)	Отожженная	10—15
	Твердотянутая	10—15
Медь хромистая (0.5% Cr)	Состаренная	80—85

* Остальное у всех броиз — медь.

Таблица 21.12. **Электрические свойства латуней различных марок при 20 °С** [11]

Сплав	Марка, состав, % (остальное медь)	ρ, 10^{-6} Ом·см	α_0, $10^{-3}K^{-1}$
Томпак	Л-96, Zn4	4,3	2,7
Латунь	Л-62, Zn38	7,1	1,7
Латунь железистомарганцовистая	ЛЖ Мц 59-1,1 Fe 11, Mn 0,8	8,9	1,8
Латунь марганцовистая	ЛМц 58-2 Mn 2, Zn 40	21,2	1,3
Латунь свинцовистая	ЛС 59-1 Pb1, Zn 40	6,5	1,7

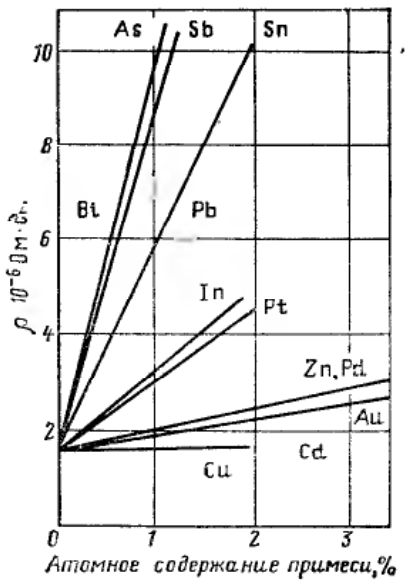


Таблица 21.13. **Удельное сопротивление чугуна и составляющих его компонентов при 20 °С [13]**

Сорт (компонент) чугуна	Чугун			Компонент чугуна			
	Серый	Ковкий	Белый	Феррит	Перлит	Цементит	Графит
ρ, 10^{-6} Ом · см	80± ±40	50±20	70±20	10,4	20	140	150—300

Таблица 21.14. **Удельное сопротивление нержавеющих сталей при 20 °С [14]**

Марка стали	3Х13	Х17	1Х18Н9, 2Х18Н9, 1Х18Н9Т	Х25С3Н	Х18Н25С2	Х20Н14С2	Х10С2М
ρ, 10^{-5} Ом · см	5.7	6.5	7,5	8,0	10,2	9,5	7,5

Таблица 21.15. **Электрические свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной молибденовой нити* [11]**

Обозначения: R — сопротивление; W — мощность накала; U — напряжение; I — ток

T, К	R, 10^{-6} Ом	W, Вт	U, 10^{-3} В	I, А
273	6,85	—	—	—
300	7,36	—	—	—
400	10,36	—	—	—
1000	30,4	1,73	7,24	248,5
1200	36,9	4,5	12,9	349,0
1400	44,6	10,0	21,1	473,0
1600	52,4	19,8	32,2	614,0
1800	59,8	35,5	46,1	772,0
2000	69,6	60,3	64,8	816,0
2200	75,4	96,5	85,2	1130,0
2400	83,3	147,8	111,0	1330,0
2600	91,8	218,5	141,4	1547,0
2800	99,8	304,0	174,0	1745,0
2895	103,4	364,4	194,0	1875,0

* Нить бесконечна в смысле отсутствия продольного теплоотвода. При пересчете к диаметру d (см) R делится на d^2, W умножается на d, U делится на $\sqrt{d}$, I умножается на $\sqrt{d^3}$.

Таблица 21.16. **Электрические свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной танталовой нити* [11].**

Обозначения: T — истинная температура; R — сопротивление; W — мощность накала; I — ток; $I_э$ — ток эмиссии

T, К	R, 10^{-6} Ом	W, Вт	U, В	I, А	$I_э$, А/см
300	17,65	—	—	—	—
1000	56,2	2,495	0,0118	211	—
1100	60,2	3,87	0,0152	254	—
1200	64,8	5,78	0,0193	299	—
1300	69,7	8,58	0,0244	352	—
1400	74,0	12,42	0,0304	408	—
1500	79,3	17,2	0,0368	469	—
1600	83,7	23,3	0,0438	528	$4{,}4\cdot10^{-5}$
1700	88,1	31,7	0,0527	602	$3{,}14\cdot10^{-4}$
1800	92,2	41,7	0,0617	676	$1{,}57\cdot10^{-3}$
1900	96,4	53,8	0,0716	751	$6{,}28\cdot10^{-3}$
2000	100,3	68,0	0,0821	828	$2{,}8\cdot10^{-2}$
2100	104,3	85,2	0,0936	910	$8{,}8\cdot10^{-2}$
2200	108,3	107,5	0,1072	1002	$2{,}7\cdot10^{-1}$
2300	112,4	132,9	0,1212	1095	$7{,}85\cdot10^{-1}$
2400	116,2	161,3	0,1357	1189	2,04
2500	120,1	196,2	0,1522	1288	4,4
2600	124,0	236,8	0,1699	1394	—
2700	127,6	282,8	0,1880	1502	—
2800	131,0	332,0	0,2064	1606	—
2900	134,5	387,0	0,2257	1715	—
3000	138,5	454,0	0,2479	1830	—
3100	142.0	526,0	0,2700	1948	—
3200	145,0	611,0	0,2940	2075	—
3269	147,0	674,0	0,3110	2164	—

* См. сноску к табл. 21.15.

Таблица 21.17. **Свойства отрезка (длиной 1 см и диаметром 1 см) бесконечной вольфрамовой нити*1 [5, 11]**

Обозначения: $T_я$ — яркостная температура, остальные обозначения см. в табл. 21.16

T, К	$T_я$, К	R, 10^{-6} Ом	W, Вт ·	U, 10^{-3} В	I, А	$I_э$, А/см*2
273	—	6,37	—	—	—	
293	—	6,99	—	—	—	—
300	—	7,20	—	—	—	—
400	—	10,26	0,0062	0,253	24,67	—
500	—	13,45	0,0305	0,64	47,62	—
600	—	16,85	0,0954	1,268	75,25	—
700	—	20,49	0,240	2,218	108,2	—
800	—	24,19	0,530	3,581	148,0	—
900	—	27,94	1,041	5,393	193,1	—
1000	966	31,74	1,891	7,749	244,1	$3{,}35\cdot10^{-15}$
1100	1058	35,58	3,223	10,71	301,0	$4{,}77\cdot10^{-13}$
1200	1149	39,46	5,210	14,34	363,4	$3{,}06\cdot10^{-11}$
1300	1240	43,40	8,060	18,70	430,9	$1{,}01\cdot10^{-9}$
1400	1330	47,37	12,01	23,85	503,5	$2{,}08\cdot10^{-8}$
1500	1420	51,40	17,33	29,85	580,6	$2{,}87\cdot10^{-7}$
1600	150_9	55,46	24,32	36,73	662,2	$2{,}91\cdot10^{-8}$
1700	159_7	59,58	33,28	44,52	747,3	$2{,}22\cdot10^{-5}$
1800	168_4	63,74	44,54	53,28	836,0	$1{,}4\cdot10^{-4}$
1900	177_1	67,94	58,45	63,02	927,4	$7{,}15\cdot10^{-4}$
2000	185_7	72,19	75,37	73,75	1022	$3{,}15\cdot10^{-3}$

Продолжение табл. 21.17

T, К	$T_я$, К	R, 10^{-6} Ом	W, Вт	U, 10^{-6} В	I, А	$I_э$, А/см
2100	1943	76,49	95,69	85,57	1119	$7{,}23\cdot10^{-2}$
2200	2026	80,83	119,8	98,40	1217	$4{,}17\cdot10^{-2}$
2300	2109	85,22	148,2	112,4	1310	$1{,}28\cdot10^{-1}$
2400	2192	89,65	181,2	127,5	1422	0,364
2500	2274	94,13	219,3	143,6	1526	0,935
2600	2356	98,66	263,0	161,1	1632	2,25
2700	2437	103,22	312,7	179,7	1741	5,12
2800	2516	107,85	368,9	199,5	1849	11,11
2900	2595	112,51	432,4	220,6	1961	22,95
3000	2673	117,24	503,5	243,0	2072	44,4
3100	2750	121,95	583,0	266,7	2187	83,0
3200	2827	126,76	671,5	291,7	2301	150,2
3300	2903	131,60	769,7	318,3	2418	265,2
3400	2978	136,49	878,3	346,2	2537	446,0
3500	3053	141,42	998,0	375,7	2657	732,0
3600	—	146,40	1130	406,7	2777	1173
3655	3165	149,15	1202	423,4	2838	1505

*1 См. сноску к табл. 21.15.
*2 $I_э$ нормировано на единицу длины нити диаметром 1 см, а не на единицу площади.

Таблица 21.18. **Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления $\alpha_0 = \rho^{-1}\cdot\partial\rho/\partial T$ рения [15]**

t,° С	ρ, 10^{-6} Ом·см	α_0, $1{,}0^{-3}$ К$^{-1}$	t,° С	ρ, 10^{-6} Ом·см	α_0, $1{,}0^{-3}$ К$^{-1}$
—253	0,015	—	900	72,5	3,13
—200	2,3	—	1100	80,5	2,94
—100	10	—	1300	87,0	2,78
0	17,5	—	1500	93,0	2,58
20	19,3	—	1700	98,5	2,44
100	25,4	3,95	1900	103,0	2,31
300	40,0	3,83	2100	106,5	2,17
500	52,0	3,58	2300	109,0	2,04
700	63,0	3,33			

Таблица 21.19. **Зависимость удельного сопротивления сплавов вольфрама и рения от температуры [15]**

4,75% Re		21% Re		27% Re	
T, К	ρ, 10^{-6} Ом·см	T, К	ρ, 10^{-6} Ом·см	T, К	ρ, 10^{-6} Ом·см
300	10,4	30	24,2	1400	67,3
630	20,4	550	34,0	1600	73,9
850	27,3	810	42,0	1800	79,9
1020	32,4	980	47,0	2000	85,7
1160	36,7	1120	51,6	2400	91,1
1270	40,0	1250	54,6	2600	96,8
1370	43,2	1360	57,4	2800	102,8
1465	45,9	1460	59,8	3000	109,2
1540	48,5	1540	62,6		
		1610	64,4		

21.5. СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сверхпроводимость — квантовое явление, возникающее вследствие Бозе-конденсации пар электронов проводимости. Двумя важнейшими макроскопическими признаками возникновения сверхпроводящего состояния являются: 1) отсутствие сопротивления протекающему постоянному электрическому току при температуре ниже некоторой критической T_c, 2) выталкивание магнитного поля из объема сверхпроводника (эффект Мейснера). Существуют критическое магнитное поле H_c и критическая плотность тока j_c, при превышении которых сверхпроводимость исчезает. Зависимость критической напряженности магнитного поля от температуры с хорошей точностью описывается формулой

$$H_c(T) = H_{c0}\left[1-\left(T/T_c\right)^2\right], \qquad (21.8)$$

где T — абсолютная температура; H_{c0} — критическая напряженность магнитного поля при нулевой температуре.

Электроны проводимости металла объединяются в пары благодаря электрон-фононному взаимодействию, вследствие чего сверхпроводимость оказывается чувствительной к свойствам кристаллической решетки. Разные кристаллические модификации одного и того же вещества имеют различную критическую температуру, T_c зависит от внешнего давления P.

К микроскопическим характеристикам сверхпроводника относятся характерный размер пары электронов ξ_0 и глубина проникновения магнитного поля λ.

Большинство сверхпроводящих сплавов относится к так называемым сверхпроводникам II рода, в которых возможно сосуществование сверхпроводимости и магнитного поля (фаза Шубникова). Магнитное поле вызывает появление в объеме таких сверхпроводников тонких нитей нормального металла (вихрей Абрикосова) с характерным размером $\sim\lambda$, каждая из которых несет квант магнитного потока $\Phi_0 = \hbar\, c/2e$, где $\hbar$ — постоянная Планка, c — скорость света, e — заряд электрона. В связи с тем, что в сверхпроводниках II рода нет полного эффекта Мейснера, в них сверхпроводимость существует при гораздо более высоких значениях напряженности магнитных полей H_{c2}.

Различные характеристики сверхпроводников представлены в табл. 21.20—21.25 и на рис. 21.11.

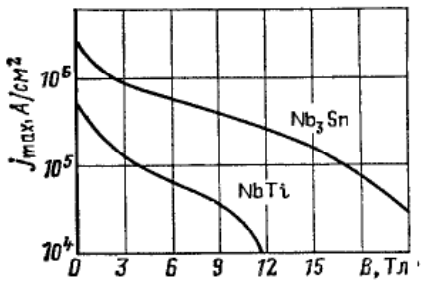


Рис. 21.11. Зависимость критической плотности тока от индукции магнитного поля при 4,2 К [22]

Таблица 21.20. **Сверхпроводимость элементов (массивные образцы при атмосферном давлении)**

Элемент		Кристаллическая структура*1	T_c, К [16]	H_{c0}, Э [16]	dT_c/dP, 10^{-11} К/Па [17]
Al	Алюминий	ГЦК	1,1796*2	104,9	—25,5
Be	Бериллий	Гекс.	0,0237*2	—	—
Cd	Кадмий	Гекс.	0,519*2	29,6	—18,2
Ga	Галлий	Ромб.	1,091	58,9	—18
Hf	Гафний	Гекс.	0,015?	—	—
Hg	Ртуть α	Ромб.	4,153	390	—36,6
	Ртуть β		3,95	340	—47,5
	Ртуть γ		3,74	—	—
In	Индий	Тетр.	3,4145*2	289	—39,1
Ir	Иридий	ГЦК	0,100*2	20,1	—0,5
La	Лантан α	Гекс.	4,88	808	190
	Лантан β		6,0	1096	113
Lu	Лютеций	Гекс.	0,1	—	—
Mg	Магний	Гекс.	0,0005	—	—
Mo	Молибден	ОЦК	0,92	98	—1
Nb	Ниобий	ОЦК	9,3*2	1980	0
Os	Осмий	Гекс.	0,66	65	—1,8
Pa	Протактиний	ОЦК	1,4	—	—
Pb	Свинец	ГЦК	7,1999*2	803,4	—38,6
Re	Рений	Гекс.	1,698	198	—2
Rh	Родий	ГЦК	0,002?	—	—
Ru	Рутений	Гекс.	0,493	47	0
Sn	Олово	Тетр.	3,722	308	—46,3
Ta	Тантал	ОЦК	4,46	831	—2,6
Th	Торий	ГЦК	1,374	162	—17
Ti	Титан α	Гекс.	0,42	56	5,5
	Титан β		5?		
Tl	Таллий	Гекс.	2,38	179,5	—23
Tc	Технеций	Гекс.	7,8*2	1410	—12,5
U	Уран γ	Ромб.	1,8	—	—
V	Ванадий	ОЦК	5,46	1167	11
W	Вольфрам	ОЦК	0,015*2	1,07	—
Zn	Цинк	Гекс.	0,851*2	52	—25
Zr	Цирконий α	Гекс.	0,53	47,7	14
	Цирконий β		1,5	—	—
	Цирконий ω		0,72	—	—

*1 ГЦК — гранецентрированная кубическая; ОЦК — объемоцентрированная кубическая; тетр. — тетрагональная; гекс. — гексагональная; ромб. — ромбическая.

*2 Значения критической температуры, рекомендованные в качестве реперных точек [19—21].

Таблица 21.21. **Сверхпроводимость элементов под давлением** [16]

Элемент		T_c^{max}, К	P, 10^8 Па	dT_c/dP, 10^{-11} К/Па
As II	Мышьяк	0,25	100	—
As III		0,5	140	—
Ba II	Барий	3,2	83	1000
Ba III		3,0	88	—150
Ba IV		5,3	200*1	13
Bi II	Висмут	3,916	25	—
Bi II		8,2	25	—32
Bi III		7,25	27	—40
Bi IV		7,0	43	—46
Bi V		6,7	68	—30

Продолжение табл. 21.21

Элемент		T_c^{max}, К	P, 10^8 Па	dT_c/dP, 10^{-11} К/Па
Bi VI		8,55	80	—23
Ce	Церий	1,7	50	—
Cs V	Цезий	1,6	125	—
Ga II	Галлий	6,24	20	—30
Ge	Германий	5,35	115	—
Hf	Гафний	0,24	160*1	—
α-La	Лантан	8,2	23	140
β-La		12	250*1	—
Lu	Лютеций	0,7	150*1	—
P	Фосфор	5,8	170	—
Pb II	Свинец	3,6	160	—2,2
Sb	Сурьма	3,55	85	—
Se	Селен	6,9	130*1	—
Si	Кремний	7,1	120	—
Sn II	Олово	5,3	113	—49,5
Te II	Теллур	4,2	70	80
Te III		4,3	70	—10
Te IV		4,3	80	—42
Tl II	Таллий	2,395	2	—10
Tl III		1,45	35	—49,5
Tl IV		2,32	40	—20
α-U	Уран	2,1	10	—
β-U		1,15	9,5	—
Y	Иттрий	2,7	170	—
α-Zr	Цирконий	0,69	45	3,5

*1 Максимальное давление, достигнутое в эксперименте.

Таблица 21.22. **Сверхпроводимость элементов в пленках** [16]

Элемент		T_c^{max}, К	Элемент		T_c^{max}, К
Al	Алюминий	5,8	Nb	Ниобий	10,0
Be	Бериллий	9,6	Re	Рений	7
Bi	Висмут	8	Sn	Олово	6,0
Cd	Кадмий	0,9	Ta	Тантал	4,51
Cr	Хром	1,52	α-Ti	Титан	1,3
Ga	Галлий	8,5	Tl	Таллий	3,15
α-Hf	Гафний	1,3	V	Ванадий	6,02
In	Индий	7	W	Вольфрам	4,55
β-La	Лантан	6,74	Zn	Цинк	1,9
Mo	Молибден	6,7			

Таблица 21.23. **Микроскопические параметры некоторых сверхпроводников** [18]

Элемент		ξ_0, нм	λ, нм
Al	Алюминий	1600—1360	16—50
Cd	Кадмий	760	110
Hg	Ртуть	—	38—45
In	Индий	354—240	64—39
Nb	Ниобий	38	39
Pb	Свинец	96—51	39—63
Sn	Олово	300—100	34—75
Tl	Таллий	420	

Таблица 21.24. **Сверхпроводимость бинарных соединений [16]**

Продолжение табл. 21.24

Состав	T_c, К	Состав	T_c, К
Кубическая структура A15			
Ti_3Ir	4,63—5,40	Nb_3Os	1,05—0,94
Ti_3Pt	0,48—0,58	Nb_3Pb	9,6
Ti_3Sb	6,5—5,7	Nb_3Pt	10,9—8,18
Zr_3Au	0,92	Nb_3Rh	2,64—2,4
Zr_3Pb	0,76	Nb_3Sb	1,9—0,4
Zr_3Sn	0,94—0,76	Nb_3Sn	18,1—18,5
V_3Al	11,65	Ta_3Au	0,51—10
V_3Au	3,15—2,97	Ta_3Pb	17,0
V_3Ga	14,6—16,8	Ta_3Pt	0,40
V_3Ge	6,3	Ta_3Sb	0,72—0,59
V_3In	13,9	Ta_3Sn	6,4
V_3Ir	1,71	Cr_3Ir	0,83
VOs	5,15—4,49	Cr_3Os	4,25—4,03
V_3Pd	0,082	Cr_4Rh	0,072
V_3Pt	3,27—3,20	Cr_3Ru	3,43
V_3Sb	0,80	Mo_3Al	0,58
V_3Si	17,2—17,0	Mo_3Ga	0,76
V_3Sn	7—3,8	Mo_3Ge	1,43
Nb_3Al	18,5—18,8	Mo_3Ir	9,6
Nb_3Au	10,6—11,5	Mo_3O	4—6,7
Nb_3Bi	3,05	Mo_3Os	11,76
Nb_3Ga	14,5	Mo_4Pt	4,53—5,6
Nb_3Ge	6,9 (23,2 в пленке)	Mo_3Re	15
		Mo_3Si	1,34
Nb_3In	9,2	Mo_3Tc	13,5—14
Nb_3Ir	1,76—1,63	W_3O	0,4—3,35
Кубическая лавес-фаза C15			
$BaRh_3$	6,0	$PbAu_2$	1,18
$BiAu_2$	1,84	$RbBi_2$	4,25
$CaIr_2$	6,15	$RhHf_2$	1,98
$CaRh_2$	6,40	$ScIr_2$	2,46
$CeCo_2$	1,5	$ScRu_2$	2,24
$CeRu_2$	6,20	$SrIr_2$	5,7
$CsBi_2$	4,75	$SrPt_2$	0,7
$HfMo_2$	0,07	$SrRh_2$	6,2
HfV_2	9,4	$ThIr_2$	6,50
KBi_2	3,58	$ThRu_2$	3,56
$LaAl_2$	3,24	YIr_2	2,18
$LaIr_2$	0,48	YPt_2	1,70
$LaOs_2$	6,5	YRh_3	1,07
$LaRu_2$	4,1	$ZrIr_2$	4,10
$LaPt_2$	0,54	ZrV_2	8,8
$LuIr_2$	2,89	ZrW_2	2,7
$LuRh_2$	1,27	$CaAu_5$ (C 15*b*)	0,34—0,38
$NbBe_2$	2,15		

Состав	T_c, К	Состав	T_c, К
Гексагональная лавес-фаза C14			
$HfOs_2$	2,69	$ThRe_2$	5,05
$HfRe_2$	5,61	$ThTc_2$	5,3
$HfTe_2$	5,6	YOs_2	4,7
$LuOs_2$	3,49	YRe_2	1,83
$LuRu_2$	0,86	YRu_2	2,42
$ScOs_2$	4,60	$ZrOs_2$	3,0
$ScRe_2$	4,2	$ZrRe_2$	6,8
$ScRu_2$	2,24	$ZrRu_2$	1,84
TaV_2	10,0	$ZrTe_2$	7,6
Тетрагональная σ-фаза			
Zr_3Ir	2,13	Cr_5Ru_3	2,10
VRe_3	6,26	Mo_7Ir_3	6,8
Nb_3Ir_2	9,8	Mo_5Os_3	5,65
Nb_3Os_2	1,86	Mo_2Re_3	6,5
Nb_xPd_y	2,0	Mo_5Ru_3	9,2
Nb_2Pt	4,2	Mo_3Tc_7	15,8
$NbRe$	3,8	$W_{0,72}Ir_{0,28}$	4,46
Nb_3Rh_2	4,1	W_xOs_y	4,4
Ta_7Pt_3	1,5	W_xRe_y	5,2
Ta_2Re_3	1,4	W_3Ru_2	4,67
Ta_3Rh_2	2,35	W_2Tc_3	7,88
Cr_2Re_3	2,50	$ReFe_3$	6,55
Кубическая χ-фаза A12			
Al_5Re_{24}	3,35	Sc_5Re_{24}	2,2
Hf_5Re_{24}	5,86	$TaOs$	1,95
$NbOs_2$	2,86	Ta_5Re_{24}	6,78
Nb_3Pd_2	2,47	Ti_5Re_{24}	6,6
$NbRe$	9,7	WRe_3	9,0
$NbTc$	10,5	Zr_5Re_{24}	7,40
$MoRe_3$	9,89	$ZrTc_6$	9,7

Кубические структуры

Тип структуры	Состав	T_c, К	Тип структуры	Состав	T_c, К
B1	GeTe	0,04—0,31	B2	LiPb	7,2
	AsSn	3,41—3,65		$Mg_{0,47}Tl_{0,53}$	2,75
	As_3Sn_4	1,23—1,16		OsTi	0,46
	SbSn	1,3—2,37		RuTi	1,07
B2	InPd	0,70		TiCo	0,71
	LaAg	0,92—0,96		TiO	2,3—0,58
				UCo	1,70

Тип структуры	Состав	T_c, K	Тип структуры	Состав	T_c, K
B20	AuBe	2,64	$D8_2$	Ag_5Hg_8	0,64
	GaPt	1,74	DO_3	Cu — Sb	0,127—1,84
C1	$AuAl_2$	0,095—0,074	$D2_3$	$RuBe_{13}$	1,3
	$AuGa_2$	1,12—1.05	$D7_3$	La_3S_4	6,5—8,25
	AuIn,	0,096—0,093		La_3Se_4	8,6—1,25
	$CoSi_2$	1,22—1,4		La_3Te_4	2,45—3,75
	$PtGa_2$	1,7—1,9	Сложные	$Be_{22}Re$	9,65
	PRh_2	1,3		$Be_{22}Tc$	5,25
	$PtAl_2$	0,48—0,55		$Be_{22}Mo$	2,529—5,545
C2	$AuSb_2$	0,58		$Be_{22}W$	4,038—4,12
	α-$PdBi_2$	1,45		$AgAu_4$	0,4—0,7
	$IrTe_2$	0,3—1,18		$AgTl_3$	2,6
	$PdSb_2$	0,35—1,25		$AuZn_3$	1,21
	$RhSe_2$	6,0		Hg_5Tl_2	3,14—3,8
	α-$RhTe_2$	0,51		$In_{19}Cd$	3,0—3,55
$E9_3$	$CoHf_2$	0,56		$Pd_{22}S$	1,63
	$CoTi_2$	3,44		$Ph_{17}S_{15}$	5,8
	$RhHf_2$	1,98		Sb_2Tl_7	5,20
	$RhZr_3$	11		γ-SnTl	4,2—6,4
LI_2	$AlLa_3$	6,16	Нитриды	TiN	4,86—5,8
	$AlZr_3$	0,73		ZrN	8,9—10,7
	$CaPb_3$	0,65		HfN	6,2—8,7
	$CaTl_3$	2,0		VN	7,5—8,2
	$BiTl_3$	4,15—4,4		NbN	16,1
	$InLa_3$	10,40		TaN	4,84—6,5
	$InLu_3$	0,14—0,24		Mo_2N	5,0
	$LaIn_3$	0,70—0,71		$ReN_{0,34}$	4—5
	$LaPb_3$	4,07—4,10		ThN	3,2
	$LaSn_3$	6,02—6,55		UN	5,6
	$LaTl_3$	1,51—1,63	Карбиды	α-MC_x	9,26—14,3
	$NaPb_3$	5,62		NbC	1,05—11,7
	$LuCa_3$	2,30		ReC	3,4
	$SiNb_3$	1,5		$Sc_{13}C_{10}$	8,5
	$SrBi_3$	2,62—5,70		TaC	1,05—11,2
	$SrPb_3$	1,85		TcC	3,85
	$ThPb_3$	5,5		TiC	3,32—3,42
	$ThSn_3$	3,33		VC	0,03
	$ThTl_3$	0,87		β-WC_x	5,2—10,0
	YIn_3	0,78	Гидриды	PdH	5
	YPb_3	4,72		PdH_2	16
	YTl_3	1,52	Бориды	HfB	3,1
	$YbAl_3$	0,94		ZrB	2,8—3,4
	$YbPb_3$	0,23			
	$ZrHg_3$	3,28			

Гексагональные структуры

A3	Ag_2Al	1,28—0,088	$B8_1$	PdSb	1,44—1,67
	Ag_2Ga	6,5—8		PdTl	3,85
	Ag_4Ge	0,85		PtSb	2,10
	Ag_5Sb	0,019—0,065		PtSn	0,37
	Ag_5Sn	0,025—0,107	C32	$BiIn_2$	5,6
	Au_5In	0,035—0,331		MoB_2	1,0—6,4
	Au_5Sn	0,4—1,1		β-$ThSi_2$	2,41
	Cu_3Ge	0,025—0,26		YGa_2	1,68
	Cu_5Si	0,050—0,058	DO_{19}	AlTh	0,75
	Pb_2Bi	8,2—8,5		Cd_3Mg	0,185
	RhW	2,64—3,37		Hg_3Li	1,7
	RhMo	1,97	D2d	$LaIr_5$	2,13
$B8_1$	AuSn	1,25		$BaAu_5$	0,7—0,35
	BiNi	4,25	$D8_8$	Zr_5Ga_3	2,5—4,0
	$BiPd_2$	4,0		Zr_5Pb_3	4,60
	BiPt	1,21—2,4		Zr_5Sb_3	1,74
	BiRh	2,06			

Тип структуры	Состав	T_c, К	Тип структуры	Состав	T_c, К
$D10_2$	B_3Ru_7	2,58	Сложные	Hg_4Na	3,05
	Co_3Th_7	1,83		MoPd	3,52
	Fe_3Th_7	1,86		ε-$MoRh_2$	1,97
	Ir_3La_7	2,24		Nb_3Te_4	1,49
	Ir_3Lu_7	0,72		α-Pd_2As	0,66
	Ir_3Th_7	1,52		Pd_5As_2	0,46
	Ni_3Th_7	1,98		Re_2B	2,8
	Os_3Th_7	1,51		TaSi	4,25—4,38
	Pt_3Th_7	0,98		Tl_3Bi_5	6,4—6,6
	Rh_3La_7	2,58		$HgSn_6$	5,1
	Rh_3Th_7	2,15	Нитриды	Ta_2N	10,6
$B8_2$	Pd_3Sn_2	0,47—0,64		MoN	12,0
	Zn_2Rh	8,2—6,4	Карбиды	β-Mo_2C	2,4—7,2
$C7$	NbS_2	5,4—6,15		η-MoC_x	7,4—9,26
	$NbSe_2$	5,4—7,5		γ-MoC	7,6—8,3
	$NbTe_2$	0,5—0,74		Nb_2C	1,98—9,11
	TaS_2	0,71—2,1		RuC	1,9—2,0
	$TaSe_2$	0,13—0,22		Ta_2C	3,2—3,3
$B18$	CuS	1,62		α-W_2C	2,74—3,6
	Ag_2F	0,066		γ-W_2C	2,85—3,05
Сложные	$AsRh_{4-1,6}$	0,03—0,56	Бориды	Mo_2B_5	8,1
	β-Bi_2Pt	0,155		NbB_2	1,0—6,4
	γ-B_4Rh	2,70		Nb_2B_5	6,4
				Re_2B	2,80
				Ru_7B_3	2,58
		Тетрагональные структуры			
$C16$	$AgZn_2$	2,11—2,46	$D2_c$	CoU_6	2,29—2,4
	$AgTh_2$	2,19—2,26		FeU_6	3,86
	$AlTh_2$	0,09		MnU_6	2,32
	$AuPb_2$	3,10—3,15		NiU_6	0,41
	$AuTh_2$	3,08—3,65	$L1_0$	α-LiBi	2,47
	$AuTl_2$	4,2		NaBi	2,25
	$CoTa_2$	0,82	C_c	$CaSi_2$	1,58
	$CoZr_2$	5,0—6,30		$LaGe_2$	1,57—3,49
	$CuAl_2$	0,65		$LaSi_2$	2,3—2,5
	$CuTh_2$	3,44—3,49		$ScGe_2$	1,3—1,31
	$GaHf_2$	0,21		Sr_2Si_3	0,55
	$GaZr_2$	0,38		$ThGa_2$	2,56
	$FeZr_2$	0,17		α-$ThSi_2$	3,16—3,20
	$NiHf_2$	0,87		YGe_2	2,4—3,8
	$NiTa_2$	0,90	Сложные	Nb_3Be_2	2,30
	$NiZr_2$	1,52—1,6		Ta_3Be_2	1,0
	$PdPb_2$	2,95—3,01		Th_3Al_2	2,6
	$PdTh_2$	0,75—0,85		$BaBi_3$	5,8
	$PdTl_2$	1,32		Tl_5Te_3	2,28—2,078
	$PtTl_2$	1,58		β-In_3Sn	7,3
	$RhPb_2$	1,32		$AuPb_3$	4,40
	$RhSn_2$	0,60		GeP	1,8—4,2
	$RhZr_2$	10,8—11,1		Pd_4Se	0,42—0,66
	$ZrTh_2$	0,67	Бориды	Ta_2B	0,06—3,12
DO_c	Mo_3P	5,31		W_2B	3,10—3,22
	W_3P	2,26		Mo_2B	4,74—5,86
		Ромбические структуры			
$B31$	AsRh	0,58	$B31$	SnPd	0,41
	GeIr	4,70		SbRu	0,35—1,27
	GePt	0,40	Орторомбические	PtTh	0,44
	GeRh	0,96		RhTh	0,36
	SiPd	0,93		$AuSn_4$	2,38
	SiPt	0,88		$PtPb_4$	2,8

Тип структуры	Состав	T_c, К	Тип структуры	Состав	T_c, К
Орторомбические	$CoLu_3$	0,35	Ромбоэдрические	α-Pd_7P_3	0,70
	$CoLa_3$	4,01		β-Pd_7P_3	1,00
	Bi_3Ni	4,06	Сложные	Zr_3Au	0,98
	Bi_3Rh	3,2		AuSn	2,48
	$AlRe_6$	1,85		$AsSn_4$	1,16—1,19
	Pd_2Sn	0,41		Ge_3Rh_5	2,12
	BiPd	3,74—3,42	Карбиды	α-Mo_2C	2,4—7,2
	KHg_2	1,2		β-W_2C	3,1—3,90
	PtTe	0,59	Бориды	TaB	4,0
	Rh_5P_4	1,22			
Ромбоэдрические	In_3Te_4	1,15—1,25			
	Ge_3Te_4	1,80—1,55			
	AsS_4	1,16—1,21			
	P_3Sn_4	1,24—1,10			
	Nb_2Be_{17}	1,47			

Продолжение табл. 21.24

Другие типы структур и соединения, для которых тип структуры точно не установлен

Состав	T_c, К	Состав	T_c, К
$PdTe_2$	1,53—1,69	$OsBe_2$	3,07
β-Pd_2As	1,71	PPb	7,8
Bi_2Pd	1,7	$P_{2,65}Sn_4$	1,21—1,10
Os_4Al_{13}	5,9	$Pd_{2,5-2,8}Se$	2,20—2,30
AuIn	0,4—0,6	Pd_3Te	0,76
$NbRu_3$	1,2	Pd_5Te	0,40
AsGe	3—3,5	Pt_5Th	3,13
Be_5Ca	6,7	$RhBe_2$	1,37
Be_5Ir	1,5	$RhSc_3$	0,32—0,92
Be_5Os	9,2	Rh_2Te	0,49
Be_5Pt	2,3	Rh_5Th	1,07
CaPb	7,0	$RuBe_2$	1,35
$CeIr_3$	3,34	Ta_2Ge	1,60
$CeIr_5$	1,82	Y_3Co	0,34
CoSe	0,35	YIr_{3-4}	3,50
Ge_2Se	1,3—1,31	CsC_8	0,020—0,135
Hg_3K	3,18	KC_8	0,39—0,55
Hg_4K	3,27	La_2C_3	5,9—11,0
Hg_8K	3,42	La_2C_2	1,61—3,33
In_3Ru	2,68	RbC_8	0,023—0,151
Ir_2Y	1,61	Th_2C_3	4,1
$LaIr_3$	2,46	V_2C_3	8,2
$LaRh_5$	1,65	WC_x	2,4—4,05
$LaRh_3$	2,60	Y_2C_3	6,0—11,5
$LuIr_2$	0,84	YC_2	3,35—3,88
$LuRh_5$	0,49	NbB	8,25
Mo_3Sb_4	2,10	NbB_6	3?
Nb_3Se_4	1,61	ZrB_{12}	5,9—6,0

Таблица 21.25. **Сверхпроводимость соединений, имеющих техническое применение** [16]

Соединение	T_c, К	j_c, А/см² (Тл), при 4,2 К	B_{c2}, Тл (Т, К)
Nb_3Sn	18,1—18,5	(1—8) · 10^5 (0)	24,5—28 (0)
NbTi	9,5—10,5	(3—8) · 10^4 (5)	12,5—16,5 (1,2)
			12 (4,2)
NbN	14,5—17,8	(2—5) · 10^7 (18)	25 (1,2)
			8—13 (4,2)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Landolt-Börnstein.** Zählenwerte und Funktionen, II Bd, 6 Teil, 6 Auflage, Berlin—Göttingen—Heidelberg: Springer-Verlag. 1959.
2. **Stewart G. R.**//Rev. Sci. Instrum. 1983. Vol. 54, N 1. P. 1—10.
3. **Макдональд Д.**//Физика низких температур: Пер. с англ./Под ред. А. И Шальникова. М: Изд-во иностр. лит. 1959.
4. **Handbuch** der Physik. Berlin—Göttingen—Heidelberg. 1956. Bd XIX.
5. **Смнтеллс К. Дж.** Вольфрам: Пер. с англ Л.—М.: Металлургиздат. 1958.
6. **Soule D. E**//Phys. Rev. 1958. Vol. 112. P. 698—705.
7. **Primak W., Fuchs L. H.** Phys. Rev. 1954. Vol. 95. P. 22—31.
8. **Spain J. L., Ubbelohde A. R., Young D. A.**//Phil. Trans. Roy. Soc. 1967. Vol. 262, N 1128. P. 345—360.
9. **Landolt-Börnstein**/.Zählenwerte und Funktionen, 6 Auflage, Springer—Verlag, 1957. IV Bd, 3 Teil
10. **Техннка** высоких температур. Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1959.
11. **Справочник** по электротехническим материалам. М.—Л.: Госэнергоиздат. 1960.
12. **Готман П. Е., Березин В. Б., Хайкин А. М.** Электротехнические материалы. М.: Энергия. 1969.
13. **Металловедение** и термическая обработка/Под ред. акад. Н. Г. Гудцова. М.: Металлургия. 1966.
14. **Краткий** справочник металлиста/Под ред. проф. А. М. Малова. М.: Машиностроение. 1965.
15. **Савнцкий Е. М., Тылкина М. Л., Поварова К. Б.** Сплавы рения. М.: Наука. 1965.
16. **Сверхпроводящие** материалы. М.: Металлургия. 1976.
17. **Коэн М.** и др. Сверхпроводимость полупроводников и переходных металлов: Пер. с англ. М.: Мир. 1972.
18. **Киттель Ч.** Введение в физику твердого тела: Пер. с англ. М.: Наука. 1978.

19. **Schooley J. F.**//J. Phys. 1978. Vol. 39, N C6. P. 1169.
20. **Utton D. B., Soulen R. J., Marshak H.**//Low Temp. Phys. 1975. Vol. 4. P. 76—85.
21. **Durieux M., Astrov D. N., Kemp W. R. G., Swenson C. A.**//Metrologia. 1979. Vol. 15. P. 57—72.
22. **Таблицы** физических величин/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат. 1976.

Глава 22
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

С. Д. Лазарев, Е. З. Мейлихов

22.1. ВВЕДЕНИЕ

Вещества, в которых при $T=0$ К верхняя из заполненных электронами энергетических зон (валентная зона) и нижняя из незаполненных электронами энергетических зон (зона проводимости) не перекрываются, являются полупроводниками или диэлектриками. Граница между ними весьма условна — в полупроводниках энергетический зазор между зоной проводимости и валентной зоной не очень велик, что приводит к появлению в зонах заметного числа свободных носителей заряда при $T\neq 0$ К.

Обычно удельное сопротивление полупроводников (при $T=290$ К) находится в интервале $10^{-3}\leqslant\rho\leqslant 10^{10}$ Ом·см (в металлах $\rho=10^{-6}\div 10^{-4}$ Ом·см).

Характерными чертами этого класса веществ являются рост электропроводимости с температурой, малая (по сравнению с металлами) концентрация носителей тока, высокая чувствительность электрических свойств по отношению к воздействию излучений и наличию примесей, а также неомическое поведение контактов.

Ширина запрещенной зоны. Ширина запрещенной зоны E_g представляет собой энергетический зазор между абсолютным максимумом валентной зоны и абсолютным минимумом зоны проводимости. Определяется по температурному ходу сопротивления или оптическими методами (край полосы поглощения, длинноволновая граница фотопроводимости). Значение E_g зависит от температуры и давления; зависимость определяется коэффициентами $\alpha_T=\partial E_g/\partial T$ и $\alpha_P=\partial E_g/\partial P$.

Подвижность носителей и проводимость. Дрейфовая подвижность $\mu_{др}=v_{др}/E$, где $v_{др}$ — дрейфовая скорость носителей в электрическом поле E. Определяется прямыми опытами по времени распространения инжектируемого импульса неосновных носителей в образце. Удельная проводимость σ связана с дрейфовой подвижностью μ_n, μ_p электронов и дырок и их концентрацией n и p соотношением $\sigma=e(n\mu_n+p\mu_p)$. Измерение эффекта Холла позволяет определить холловскую подвижность $\mu_H=|R\sigma|$, где R — коэффициент Холла.

Эффект Холла. В полупроводнике, который помещен в магнитное поле, перпендикулярное протекающему по нему току, возникает электрическое поле, перпендикулярное току и магнитному полю. Это — так называемый эффект Холла, описываемый соотношением

$$E_H=RjH,$$

где E_H — напряженность холловского электрического поля; j — плотность тока; H — напряженность магнитного поля; R — коэффициент Холла.

В случае носителей одного сорта (концентрацией n)

$$R=\pm r/ne.$$

Здесь R измеряется в см³/Кл; n — в см$^{-3}$; $e=1{,}6\cdot 10^{-19}$ Кл; r — числовой множитель (так называемый холл-фактор), значение которого определяется механизмом релаксации импульса носителей. Знак R связан со знаком заряда носителей ($R<0$ в образцах n-типа, $R>0$ в образцах p-типа).

При наличии двух сортов носителей (например, электронов и дырок) R зависит от напряженности магнитного поля:

$$R=\frac{R_n\sigma_n\left(1+\sigma_p^2H^2R_p^2\right)+R_p\sigma_p\left(1+\sigma_n^2H^2R_n^2\right)}{(\sigma_n+\sigma_p)^2+\sigma_n\sigma_p(R_n+R_p)H^2}.$$

Здесь $\sigma_n=ne\mu_n$; $\sigma_p=pe\mu_p$; $R_n=-1/ne$; $R_p=1/pe$.

При $H\longrightarrow\infty$ $R\longrightarrow\dfrac{1}{e(p-n)}$, если $p\neq n$, и

$$R=\frac{1}{ne}\,\frac{\mu_p-\mu_n}{\mu_p+\mu_n},\qquad \text{если } n=p.$$

Холловская подвижность носителей μ_H определяется соотношением $\mu_H=|R\sigma|$.

Время жизни носителей. Время жизни τ представляет собой время, за которое неравновесная концентрация носителей спадает за счет их рекомбинации до равновесного значения. Основные механизмы рекомбинации — излучательный (энергия рекомбинирующей пары электрон—дырка излучается в виде фотона), фононный (энергия передается решетке), ударный (энергия пары передается третьей частице).

Чаще всего имеет место не прямая рекомбинация, а процесс идет через рекомбинационные центры (примеси, дефекты).

Теоретическая оценка времени излучательной рекомбинации τ_R дает верхний предел значения τ. Для $T=300$ К и концентрации, близкой к собственной, значения τ_R приведены в табл. 22.1. Здесь же приведены реальные значения τ.

Таблица 22.1. **Время рекомбинации τ и время излучательной рекомбинации τ_R для некоторых полупроводников [162] (концентрация носителей близка к собственной, $T=300$ К)**

Полупроводник	Si	Ge	InSb	InAs	PbS	PbSe	PbTe
τ_R, с	3	0,3	$3\cdot10^{-7}$	10^{-5}	10^{-5}	$3\cdot10^{-6}$	$2\cdot10^{-6}$
τ, с	$2\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-7}$	10^{-7}	10^{-5}	—	—

Поверхностная рекомбинация. Помимо рекомбинации в объеме носители могут рекомбинировать на поверхности полупроводника. Скорость поверхностной рекомбинации s определяется как скорость потока частиц из объема к поверхности, необходимого для поддержания на ней избыточного числа неравновесных носителей. Скорость s сильно зависит от способа обработки поверхности. Так, для Ge при травлении поверхности в кипящей H_2O_2 $s\approx 10$ см/с, а при шлифовке $s\approx 10^6$ см/с и более. Обычно $s\approx 10^2\div 10^3$ см/с.

Длина диффузии. Длина диффузии L_D — расстояние, характеризующее пространственный спад неравновесной концентрации носителей до равновесного значения. Значение L_D определяется через коэффициент диффузии D и время жизни τ с помощью соотношения $L_D=\sqrt{D\tau}$. Коэффициент диффузии и подвижность связаны соотношением Эйнштейна $D=kT\mu/e$ (в невырожденном полупроводнике). Максимальная длина диффузии характеризует степень совершенства и чистоты кристалла. При $T=300$ К $L_D\approx 0{,}5$ см в Ge, $L_D\approx 0{,}3$ см в Si, $L_D\approx 10^{-2}\div 10^{-3}$ см в InSb [162].

Структура зон и эффективные массы. Эффективная масса носителя характеризует его движение в кристаллической решетке. Обратная эффективная масса $(m^*)^{-1}$ — тензорная величина, определяемая зависимостью $E(\mathbf{p})$ энергии носителя от его квазиимпульса:

$$\left(m^*\right)^{-1}_{ij}=\partial^2 E(\mathbf{p})/\partial p_i\,\partial p_j\,.$$

Обычно достаточно знать вид $E(\mathbf{p})$ лишь вблизи экстремальных точек — минимумов или максимумов энергии. Изоэнергетические поверхности вблизи экстремумов часто представляют в виде сфер (с эффективными массами, например, для нескольких подзон валентной зоны m_{p1}, m_{p2} и т. д.) или эллипсоидов (с эффективными массами для зоны проводимости $m_{n\parallel}$, $m_{n\perp 1}$, $m_{n\perp 2}$*).

Для анализа различных экспериментальных данных часто пользуются понятием скалярной эффективной массы плотности состояний (m_{dn} и m_{dp} для электронов и дырок соответственно), которая в случае эллипсоидальных изоэнергетических поверхностей находится из соотношения

$$m_d=N^{2/3}\left(m_{\parallel}\,m_{\perp 1}\,m_{\perp 2}\right)^{1/3}\,,$$

где N — число экстремумов зоны.

В случае энергетических зон, имеющих вырожденные сферические поверхности постоянной энергии с эффективными массами m_{p1}, m_{p2} и т. д., эффективная масса плотности состояний определяется следующим образом:

$$m_{dp}=\left(m_{p1}^{3/2}+m_{p2}^{3/2}+\ldots\right)^{2/3}.$$

Вводятся также понятия омической эффективной массы m_σ и циклотронной эффективной массы m_c, определяемые соотношениями

$$\frac{1}{m_\sigma}=\frac{1}{3}\left(\frac{1}{m_{\parallel}}+\frac{1}{m_{\perp 1}}+\frac{1}{m_{\perp 2}}\right)$$

(эллипсоидальные изоэнергетические поверхности),

$$m_c=\frac{h}{2\pi}\,\frac{\partial S}{\partial E}$$

(S — площадь сечения изоэнергетической поверхности плоскостью, нормальной к магнитному полю).

Общие выражения для m_d, m_σ, m_c см., например, в [84].

Прямым методом определения $E(\mathbf{p})$ и эффективных масс является циклотронный резонанс. Ценные сведения о зонной структуре и эффективных массах дают измерения анизотропии магнетосопротивления, эффектов типа Шубникова — де Гааза и магнетооптических эффектов.

Собственная концентрация носителей. Собственная концентрация носителей n_i соответствует идеально чистому материалу и вычисляется, если известна структура зон и эффективные массы, по формуле

$$n_i=4{,}82\cdot 10^{15}T^{3/2}\left(\frac{m_{dn}\,m_{dp}}{m_0^2}\right)^{3/4}\exp\left(\frac{E_g-\alpha_T\,T}{2kT}\right)\,,$$

где m_{dn}, m_{dp} — эффективная масса плотности состояний электронов и дырок соответственно; m_0 — масса свободного электрона; k — постоянная Больцмана; α_T — коэффициент температурной зависимости ширины запрещенной зоны.

Обычно n_i определяют экспериментально по данным измерений эффекта Холла и проводимости в соответствующем интервале температур.

Температура Дебая T_D определяется через граничную частоту ω_m колебаний решетки с помощью соотношения:

$$kT_D=\hbar\omega_m.$$

Различным ветвям колебаний соответствуют, вообще говоря, различные значения температуры Дебая. Значения T_D, определяемые из тепловых измерений, являются усредненными по существенным при температуре измерений ветвям колебаний. Более детальную информацию дают, например, измерения упругих констант.

Предельная частота оптических фононов ω_l, ω_t есть частота соответствующих (продольных и поперечных) оптических колебаний решетки с длиной волн, значительно превышающей межатомное расстояние. Определяется из спектров поглощения и отражения инфракрасного излучения, а также с помощью нейтронной спектроскопии. Для элементов (Si, Ge и др.): $\omega_l=\omega_t=\omega_0$.

Фактор спектроскопического распределения g в зоне проводимости (или валентной) определяется расщеплением энергетических уровней носителей в магнитном поле за счет их магнитного момента

$$E=\left(n+\frac{1}{2}\right)\hbar\omega_H\pm\frac{1}{2}\,g\hbar\omega_H\,,\qquad n=1,2\ \ldots\,,$$

где ω_H — циклотронная частота носителя заряда в кристалле, определяется из измерений осцилляционных эффектов в магнитном поле методом пара- и ядерного магнитного резонанса.

Диэлектрическая проницаемость. Значения диэлектрической проницаемости ε_0 и ε_∞ получают из статических и высокочастотных (или оптических) измерений соответственно. В таблицах везде, где не отмечено специально, приводимые значения относятся к $T=290$ К.

В таблицы в основном включены данные о полупроводниках с $E_g<3$ эВ. Тройные и более сложные полупроводниковые соединения не описаны *. Не приведены также сведения о параметрах различных полупроводниковых приборов

22.2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

22.2.1 Кремний и германий

Кремний и германий — широко используемые и наиболее исследованные полупроводники. Кристаллизуются в решетке алмаза. Имеют сложную зонную структуру.

---

* Часто $m_{\perp 1}=m_{\perp 2}$ тогда употребляется обозначение $m_\perp=m_{\perp 1}=m_{\perp 2}$.

* О свойствах некоторых классов тройных соединений — см. [16, 121, 123, 145, 289, 290].

Таблица 22.2. Электрофизические свойства элемеитарных полупроводииков [293]

Элемент	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, b, c, нм	ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К
α-B	Ромбоэдр., D^5_{3d}	0,5057 (a), $\alpha = 58°\ 06'$	2,45	2350—2400	1,97 ($E \parallel c$) 1,90 ($E \perp c$)	—
β-B	То же	1,014 (a), $\alpha = 65°\ 17'$	2,33	2350—2400	1,63 ($E \parallel c$) 1,61 ($E \perp c$) 1,56 (0 К)	—2
C (алмаз)	Куб., O^5_h	0,3566 [1]	3,51 [123]	4300 [123]	5,4 [28] 5,48 [292]	—1,2 [28] —0,5 [292]
P (чериый)	Орторомб., D^{18}_{2h}	0,331 (a); 0,437 (b); 1,047 (c)	2,70	1300	0,33 (0 К)	—2,8
α-S	Орторомб., D^{24}_{2h}	1,046 (a); 1,288 (b); 2,448 (c)	2,069	—	3,8	—
As (серый)	Ромбоэдр., D^5_{3d}	0,376 (a); 1,076 (c)	5,72	1090	0,175	—
Se	Триг., D^4_3, D^6_3	0,435 (a); 0,494 (c)	4,819	490	1,9 (5 К)	—2,7
α-Se	Моноклин.	0,905 (a); 0,907 (b); 1,161 (c)	4,9	—	2,48 (5 К)	—
α-Sn	Куб., O^7_h	0,649 [292]	7,28 [292]	505*2 [121]	0,09 [122]	—5 [122]
Sb	Ромбоэдр., D^5_{3d}	0,4308 (a); 1,1274 (c)	6,69	903	0,1 (1,15 К)	—
Te	Триг., D^4_3; D^6_3	0,446 (a); 0,595 (c)	6,24	723	0,335 (4,2 К)	+1,8 (T<4,2 К) —0,4 (100—300 К)

T_D, К	m_n/m_0	m_p/m_0	μ_n, см²/(В·с)	μ_p, см²/(В·с)	ε_0	ε_∞	n_i, см$^{-3}$
1430 (0 К)	—	—	—	120	—	—	—
1220 (100 К) 1300 (0 К)	4,5	1,8	1 [11]	300	11,55 ($E \perp c$); 10,24 ($E \parallel c$)	9,12 ($E \perp c$); 8,41 ($E \parallel c$)	—
2240*1 [123]	1,4 (m_l) [313] 0,36 (m_t)	2,35*3 [15] 2,1 [123]	1800 ($\sim T^{-3/2}$) [11]	1400 ($\sim T^{-3/2}$) [123]	5,7 [292]	5,7 [121]	—
400	0,16 (m_{n1}) 0,81 (m_{n2}) 0,24 (m_{n3})	0,17 (m_{p1}) 0,71 (m_{p2}) 0,59 (m_{p3})	220	350	—	—	—
250	—	—	7,5	10	3,6—4,6 (анизотропна)	—	—
250 282 (4,2 К)	0,134 (m_{n1}) 1,252 (m_{n2}) 0,141 (m_{n3})	0,146 (m_{p1}) 0,104 (m_{p2}) 0,166 (m_{p3})	40—550 (анизотропна)	50—1210 (анизотропна)	50	—	$2{,}16 \cdot 10^{20}$
152,5 171 (0 К)	—	1,4 (m_d)	—	40	—	—	10^{14}
128 (<20 К) 230 [121]	— 0,023 [122]	— 0,26 [122]	4 ($\sim T^{-3/2}$) 2500 ($\sim T^{-1,65}$) [11]	0,2 2400 ($\sim T^{-2}$) [11]	7,39 —	6,1 24 [292]	— —
		0,20*4 [292]	10^5 (78 К) [238] 10^5 (4,2 К) [238]				

T_D, К	m_n/m_0	m_p/m_0	μ_n, см²/(В·с)	μ_p, см²/(В·с)	ε_0	ε_∞	n_i, см$^{-3}$
168 (10 К) 211 (0 К)	0,068 (m_{n1}) 0,63 (m_{n2}) 0,34 (m_{n3})	0,093 (m_p)[1] 1,14 (m_{p2}) 0,093 (m_{p3})	0,11—2,74 (анизотропна)	0,18—3,63 (анизотропна)	80 (4,2 К)	—	$4{,}2\cdot10^{19}$
140 ($\perp c$) [220]	0,06 ($m_\perp$)	0,114 ($m_\perp$)	2380 ($\parallel c$)	1260 ($\parallel c$)	—	23 ($\perp c$) [28]	$5{,}6\cdot10^{15}$
290 ($\parallel c$) [120]	0,05 ($m_\parallel$)	0,109 ($m_\parallel$)	1150 ($\perp c$)	650 ($\perp c$)		39 ($\parallel c$) [28]	

[1] $\hbar\omega_l = \hbar\omega_t = 0{,}165$ эВ [123]
[2] Переходит в β-Sn при 558 К.
[3] Тяжелые дырки. Для легких дырок $m_p/m_0 = 0{,}7$ [313].
[4] Тяжелые дырки. Для легких дырок $m_p/m_0 = 0{,}06$ [292].

Таблица 22.3. **Электрофизические свойства Si и Ge**

Элемент	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, нм [123]	ρ, г/см³ [123]	$T_{пл}$, К [123]	T_D, К [117]	$\hbar\omega_0$, эВ, [123]	ε_0 [28]	σ_∞
Si	Куб., O_h^7	0,543	2,33	1690	689 539 (80 К)	0,063	11,7	12,7 ($\lambda = 1{,}05$ мкм) [28] 13,7 ($\lambda = 8$ мм) [117]
Ge	То же	0,566	5,32	1210	406 353 (80 К)	0,037	16	16,5 ($\lambda = 2{,}5$ мкм) [28]

Элемент	E_g, эВ [292]	E_{Γ_Λ}, эВ	$E_{\Gamma\Lambda}$, эВ	Δ_{so}, эВ	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К [292]	$\partial E_g/\partial P$, 10^{-6} эВ/бар	$\partial E_{\Gamma_\Lambda}/\partial T$, 10^{-4} эВ/К	$\partial E_{\Gamma_\Lambda}/\partial P$, 10^{-6} эВ/бар	$\partial E_{\Gamma\Lambda}/\partial P$, 10^{-11} эВ/Па (10^{-6} эВ/ат)
Si	1,11 1,17 (0 К)	2,3 [84]	1,5 [84]	0,044 [123]	—2,8	—1,4 [292] —3,8 [80 К]	—	—	—
Ge	0,664 0,744 (1,5 К)	0,05 [123] 0,15 [84]	0,02 [123]	0,28 [117] 0,30 [123]	—3,7	5 [123] 3 [292]	—4 [123]	7 [123]	—(12—14) [123]

Элемент	m_n/m_0 [84]	m_{dn}/m_0	m_{ns}/m_0 [117]	m_{p1}/m_0	m_{p2}/m_0	m_{p3}/m_0	m_{dp}/m_0	n_i, см$^{-3}$ [292]	ρ_i, Ом·см [11]	μ_n, см²/(В·с)	μ_p, см²/(В·с)
Si	0,9163 ($\parallel$) 0,1905 ($\perp$)	0,33	0,26	0,537	0,153	0,25	0,81 [292]	$1{,}02\cdot10^{10}$ (300 К)	$2{,}3\cdot10^5$	3000 ($\sim T^{-2,6}$)	500 [123] ($\sim T^{-2,3}$) [117]
Ge	1,588 ($\parallel$) 0,0815 ($\perp$)	0,22	0,12	0,34	0,043	0,08	0,39 [123]	$2{,}33\cdot10^{13}$ (300 К)	47	3800 ($\sim T^{-2,3}$)	1820 [123] ($\sim T^{-1,67}$) [28]

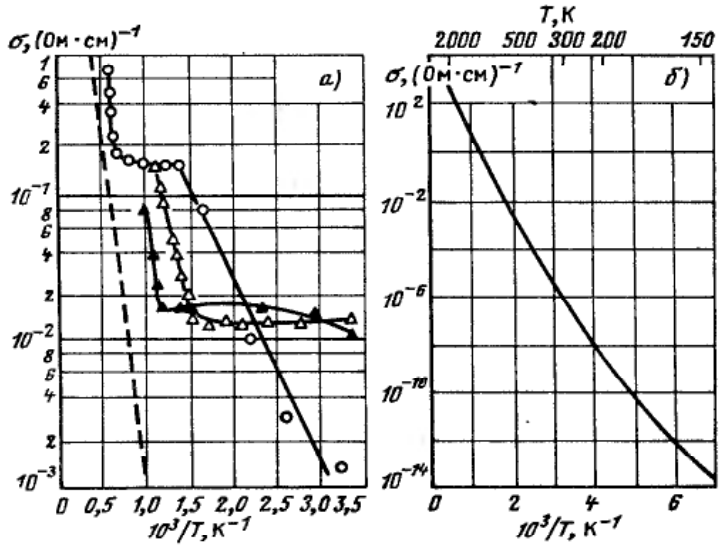


Рис. 22.1. Температурная зависимость удельной проводимости α-B(*а*) и β-B(*б*):

пунктир — асимптотическое приближение при E_a=1 эВ; △ — гранулы; ▲ — кристаллы; ○ — поликристалл

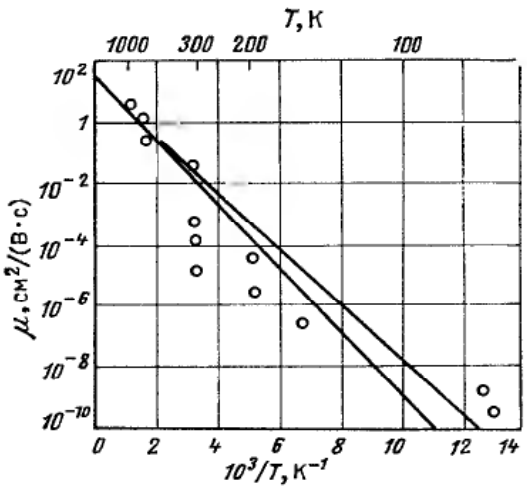


Рис. 22.4. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в β-B [293]:

линии — расчет по разным моделям

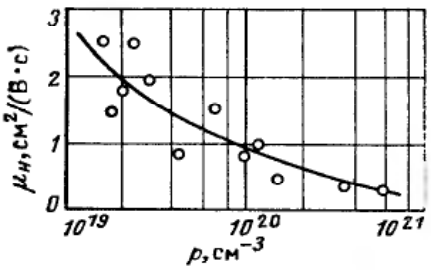


Рис. 22.5. Зависимость холловской подвижности электронов в поликристаллическом β-B от концентрации носителей [7, 14]

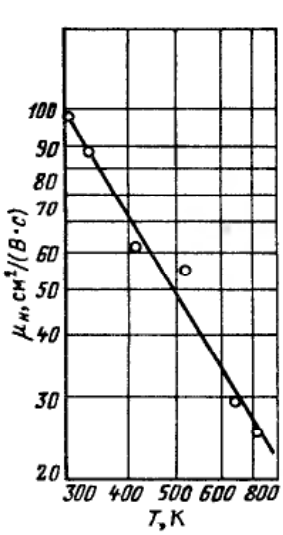


Рис. 22.2

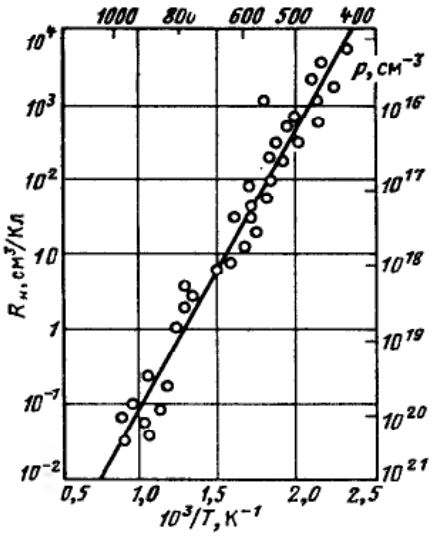


Рис. 22.3

Рис. 22.2. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в α-B [6]

Рис. 22.3. Температурная зависимость коэффициента Холла и концентрация дырок в β-B при высоких температурах [293]

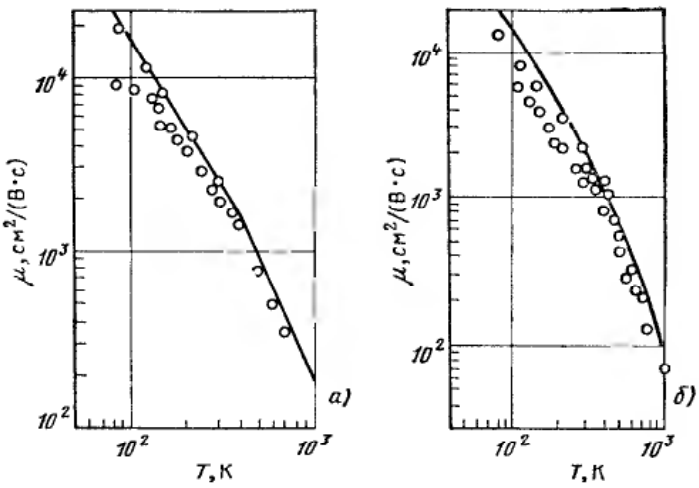
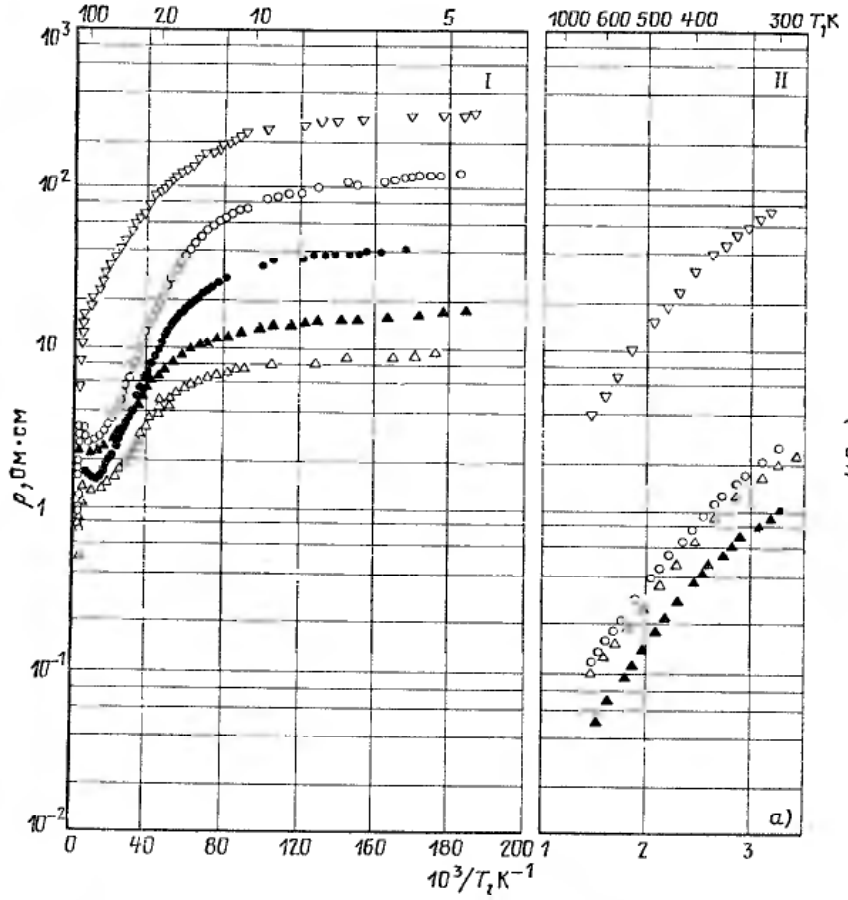
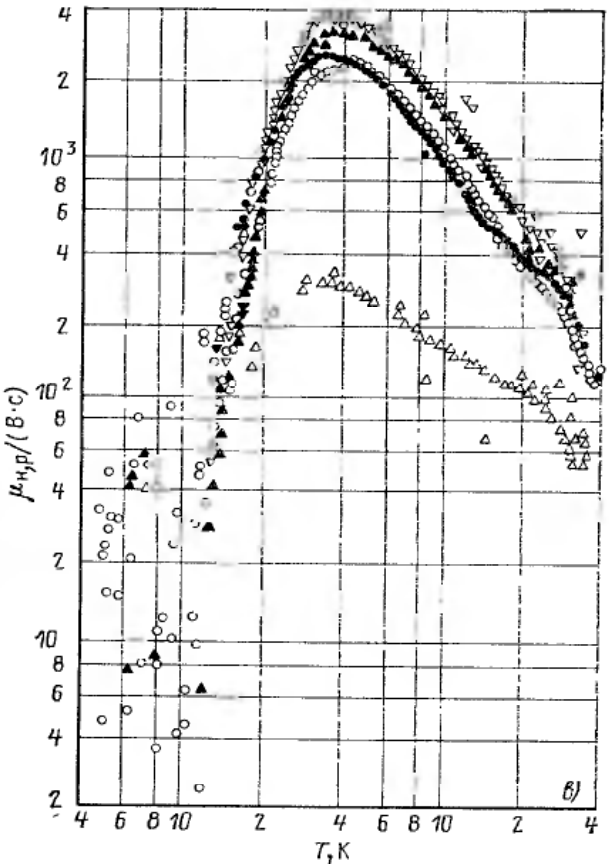


Рис. 22.6. Температурные зависимости подвижности электронов (*а*) и дырок (*б*) в алмазе [313]





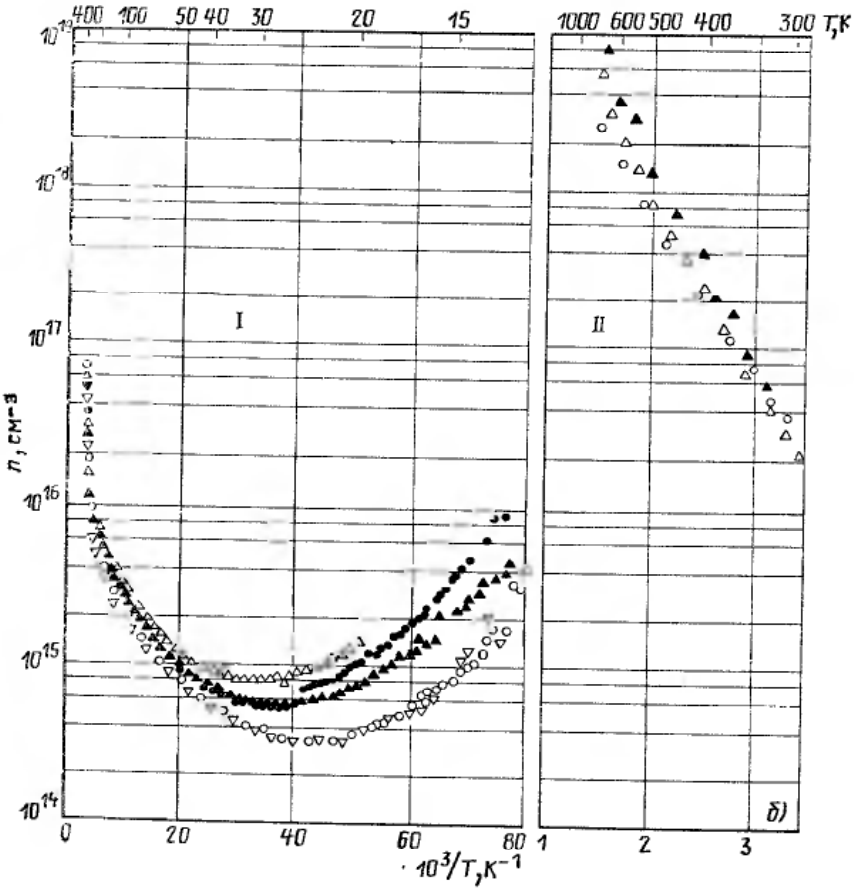


Рис. 22.7. Температурные зависимости удельного сопротивления (*а*) полной концентрации носителей (*б*) и холловской подвижности дырок (*в*) в поликристаллическом черном фосфоре [17]:

I — низкие температуры; *II* — высокие температуры

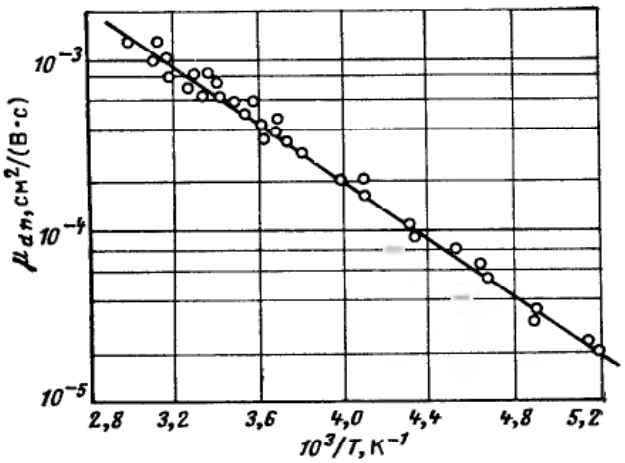


Рис. 22.8. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в α-S[37]

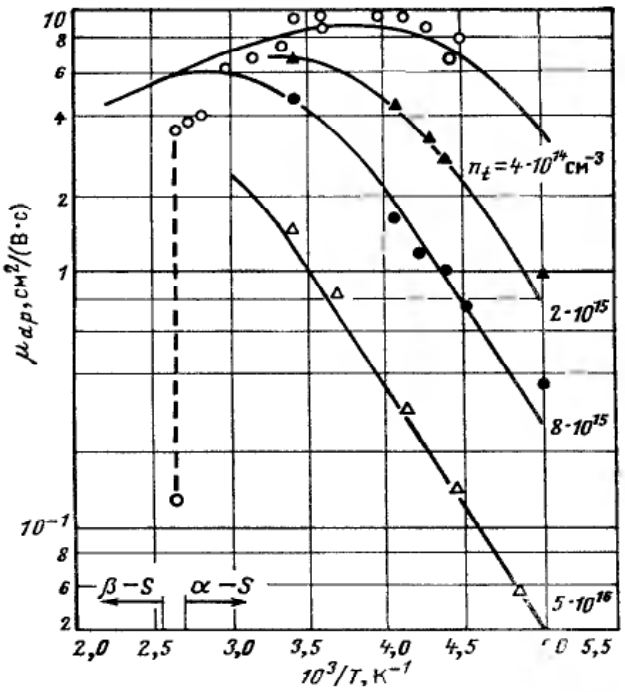


Рис. 22.10. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в α-S для образцов с различной концентрацией дырочных ловушек n_t. При фазовом переходе α-S⟶β-S подвижность резко уменьшается [53]

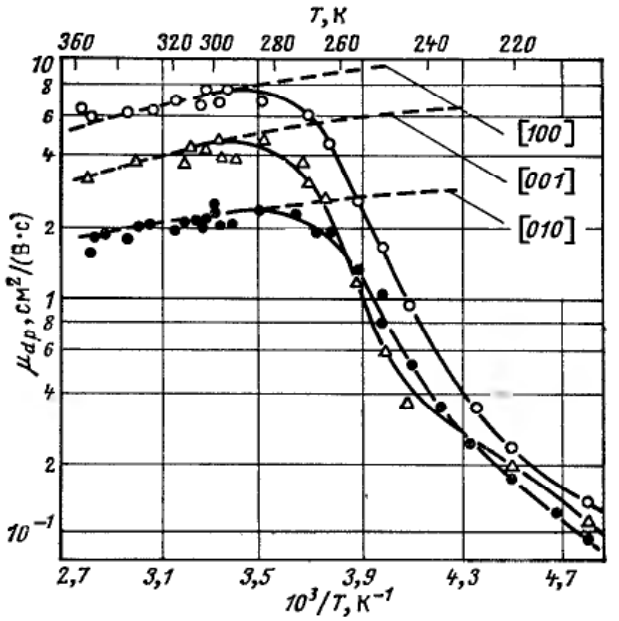


Рис. 22.9. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок вдоль различных кристаллических осей в α-S [39]:
пунктир — зависимость $\mu \infty T^{-n}$, где $n=1{,}6$ [100], $n=1{,}1$ [010], $n=1{,}7$ [001]

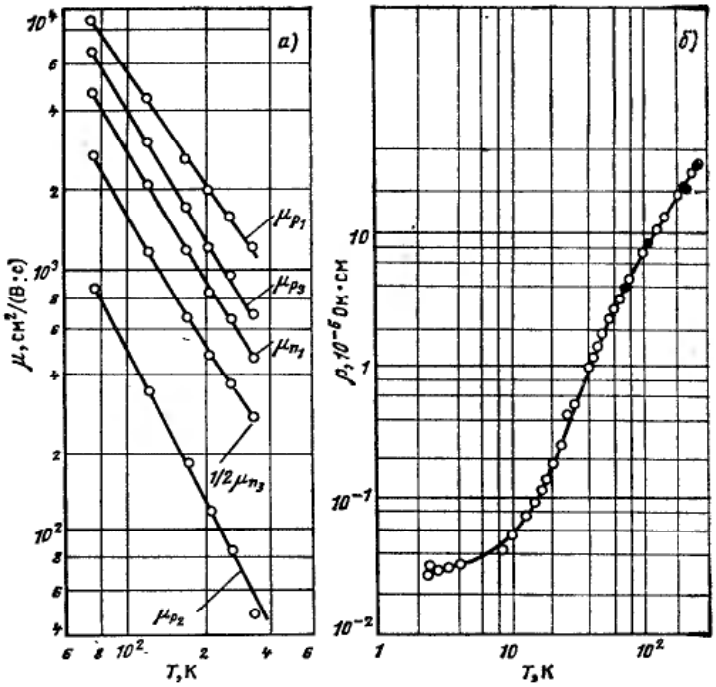


Рис. 22.11. Температурные зависимости подвижности электронов и дырок (*а*) и удельного сопротивления (*б*) в As. Характер зависимости μ_{n1}, μ_{n_3} и $\mu_{p_3} \infty T^{-1,7}$, $\mu_{p1} \infty T^{-1,5}$, $\mu_{p2} \infty T^{-2,0}$ [57]

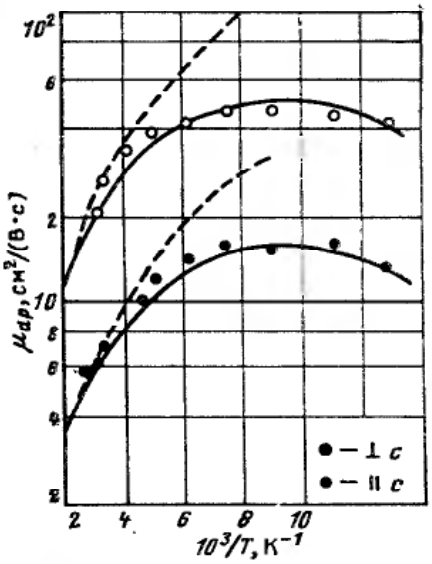


Рис. 22.12. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в тригональном Se [19]:
пунктир соответствует зависимости $T^{-3/2}$

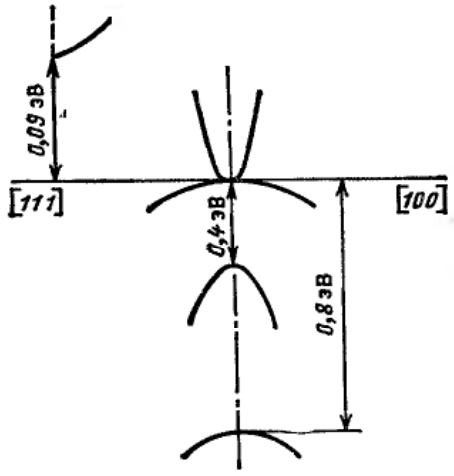


Рис. 22.14. Зонная структура α-Sn [171]

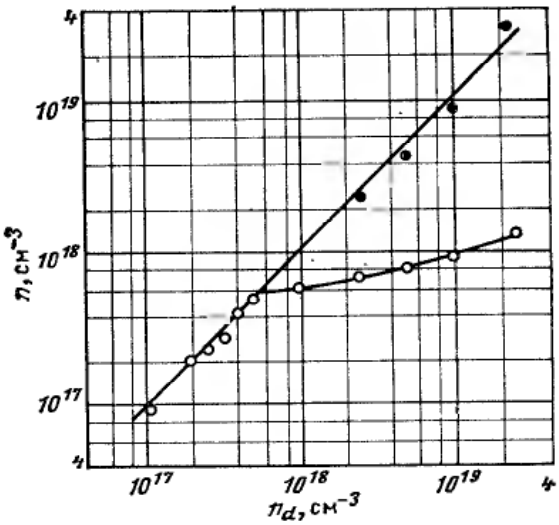


Рис. 22.15. Зависимость концентрации электронов в α-Sn при $T=4{,}2$ К от концентрации доноров [24]:
○ — легкие электроны; ● — все электроны

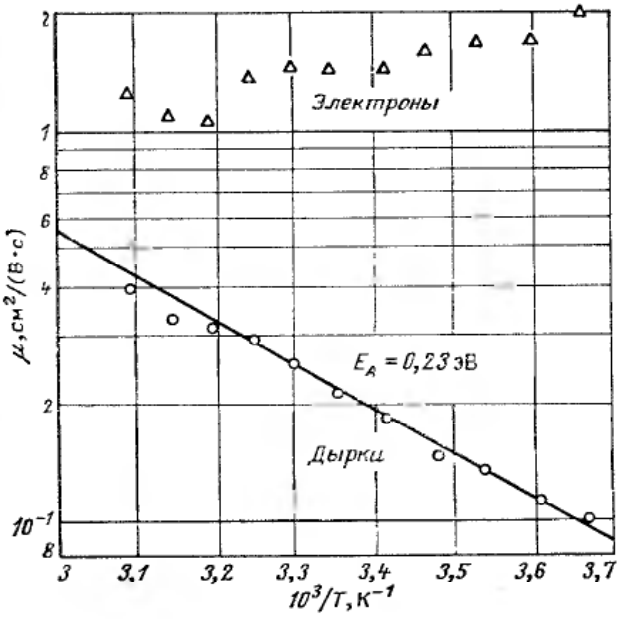


Рис. 22.13. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок и электронов в моноклинном Se (E_A — энергия активации подвижности дырок) [20]

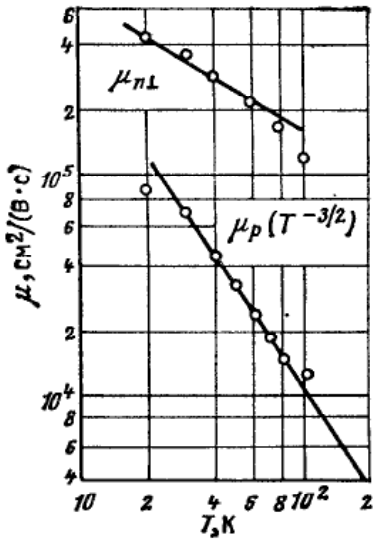


Рис. 22.16. Температурная зависимость подвижности легких электронов и дырок в α-Sn:
сплошные линии — расчет [24]

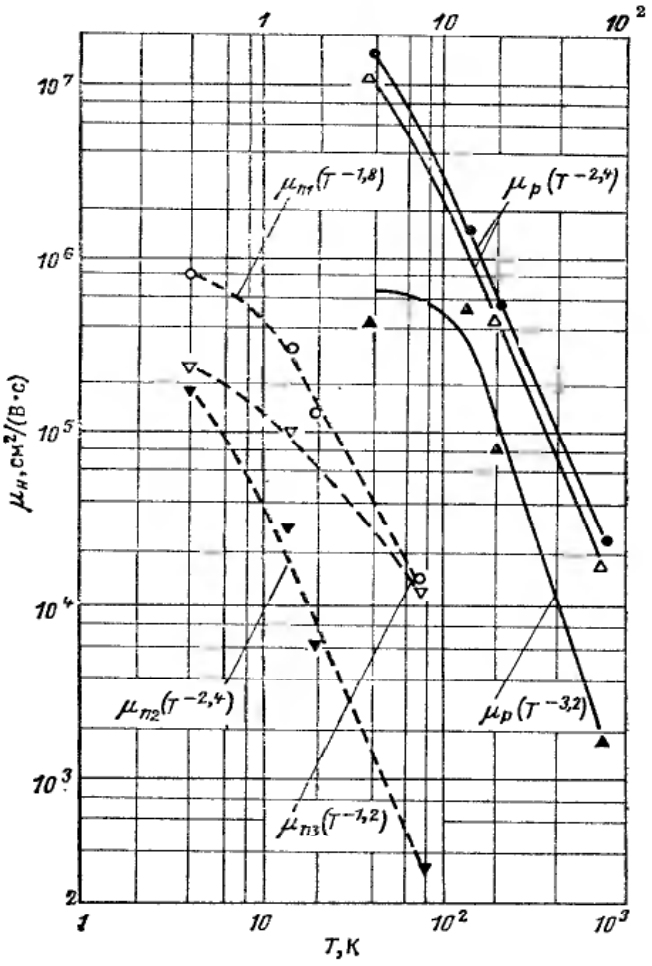


Рис. 22.17. Температурные зависимости компонентов тензора подвижностей электронов (пунктирные линии) и дырок (сплошные линии) в Sb [29]. Концентрации электронов и дырок — $4 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$:
нижняя шкала температур для μ_n, верхняя — для μ_p

В Si 6 эквивалентных абсолютных минимумов зоны проводимости расположены на осях [100] внутри зоны Бриллюэна. Вблизи каждого из этих минимумов изоэнергетические поверхности имеют вид эллипсоидов вращения (число эллипсоидов — 6).

В Ge 8 эквивалентных абсолютных минимумов зоны проводимости расположены на осях [111] на границе зоны Бриллюэна. Вблизи каждого из этих минимумов изоэнергетические поверхности — эллипсоиды вращения (эквивалентное число эллипсоидов 4).

Валентные зоны Si и Ge расщеплены на три подзоны, две из которых вырождены в точке $k=0$, а третья отщеплена за счет спинорбитального взаимодействия.

Схемы энергетических зон Si и Ge (с использованными в таблицах обозначениями) представлены на рис. 22.22, 22.23.

Электрофизические свойства Si и Ge представлены в табл. 22.3—22.5 и на рис. 22.24—22.43.

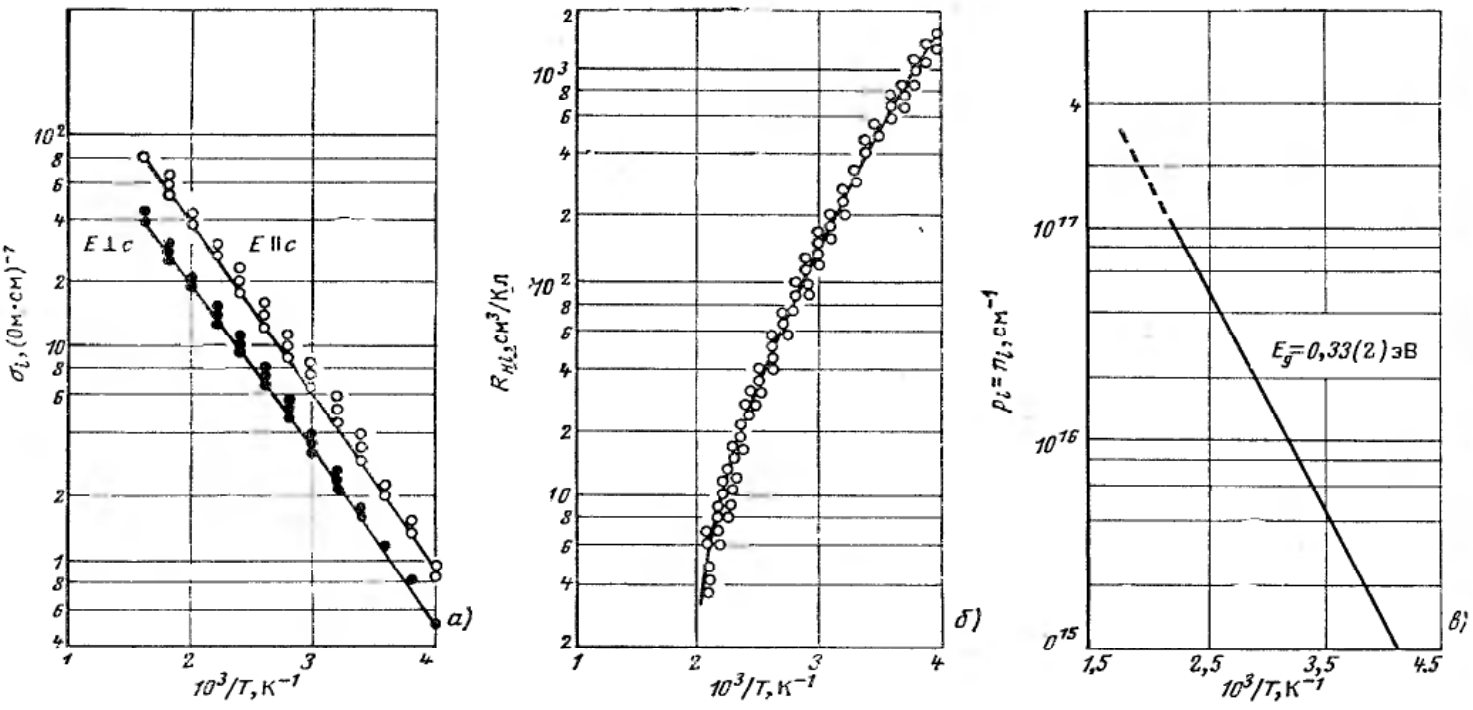


Рис. 22.18. Температурные зависимости удельной проводимости (*а*), коэффициента Холла (*б*) и собственной концентрации носителей (*в*) в Te [30]

Таблица 22.4. **Свойства примесей в Si** [292]

Примесь	Ag		Al	As	Au		B	Bi	Cu
Тип*1	*A*	*D*	*A*	*D*	*A*	*D*	*A*	*D*	*A*
E_i, эВ*2	0,93 0,86 0,40	0,59 0,83 0,89	0,068	0,054	0,6—0,7	0,8	0,045	0,071	0,24 0,37 0,52

Примесь	Fe	Ga	In	Li	O	P	S	Sb	Tl	Zn
Тип*1	*A*	*A*	*A*	*D*	*D*	*D*	*D*	*D*	*A*	*A*
E_i, эВ*2	0,4	0,071	0,155	0.034	0.06	0,045	0,31	0,043	0,246	0,316 0,617

*1 *D* — донор, *A* — акцептор.
*2 Для доноров энергия ионизации отсчитывается от дна зоны проводимости, для акцепторов — от края валентной зоны.

Таблица 22.5. **Свойства примесей в Ge** [117, 123, 292]

Примесь	Al	Ag	As	Au	B	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe
Тип*1	*A*	*A*	*D*	*A*	*A*	*A*	*D*	*A*	*A*	*A*	*A*	*A*
E_i, эВ*2	0,0111	0,13 0,5 0,7	0,0142	0,16 0,59 0,75	0,0108	0,07	0.0128	0,05 0,15	0,09 0,25 0,48	0,07 0,12	0,33 0,4 0,53	0,35 0,52

Примесь	Ga	In	Li	Mn	Ni	O	P	Pt	S	Sb	e	Te
Тип*1	*A*	*A*	*D*	*A*	*D*	*D*	*D*	*A*	*D*	*D*	*D*	*D*
E_i, эВ*2	0,0113	0,0120	0,0100	0,16	0,3	0,017 0,04 0,20	0,0129	0,2 0,4	0.18	0.0103	0,14	0,11 0,30

*1 *D* — донор, *A* — акцептор.
*2 Для доноров энергия ионизации отсчитывается от дна зоны проводимости, а для акцепторов — от края валентной зоны.

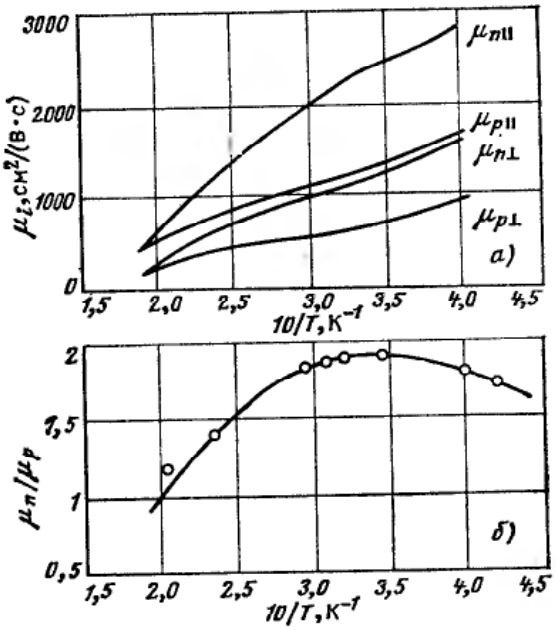


Рис. 22.19. Температурные зависимости подвижности электронов и дырок (*а*) и отношения подвижностей (*б*) в области собственной проводимости Te [30]

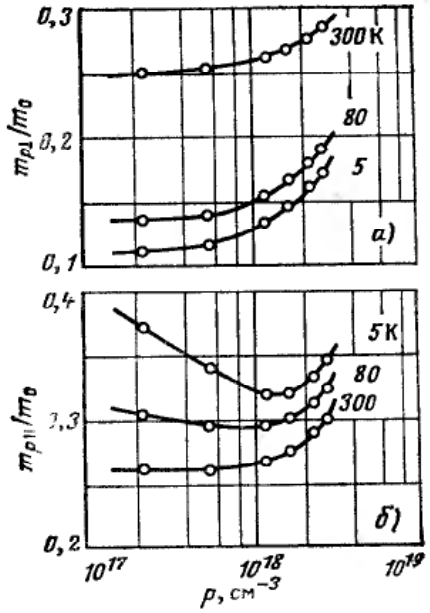


Рис. 22.21. Зависимость поперечной (*а*) и продольной (*б*) эффективной массы дырок от их концентрации в Te [293]

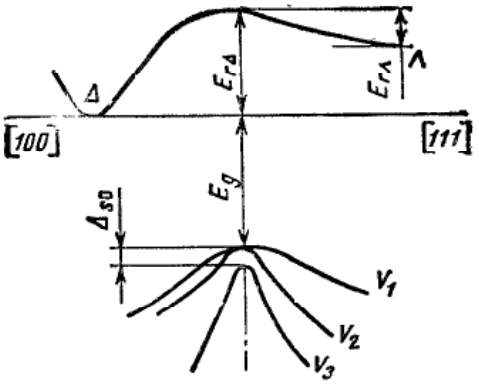


Рис. 22.22. Зонная структура Si [117]

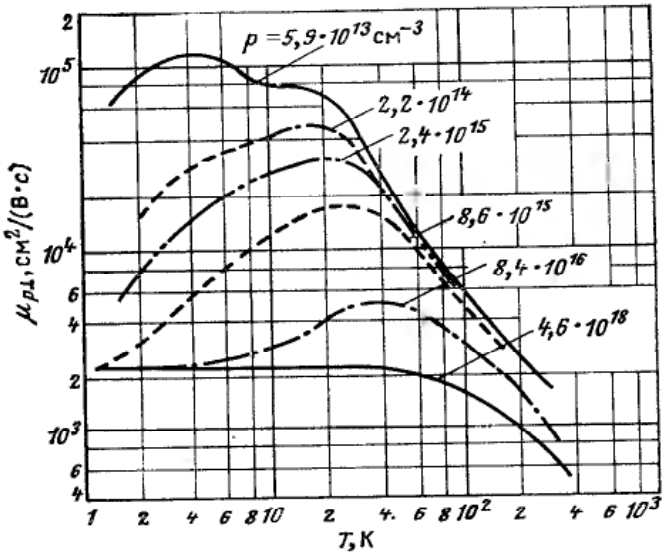


Рис. 22.20. Температурная зависимость подвижности дырок в Te вдоль оси *c* [35]

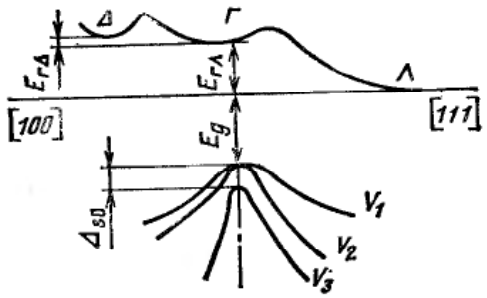


Рис. 22.23. Зонная структура Ge [117]

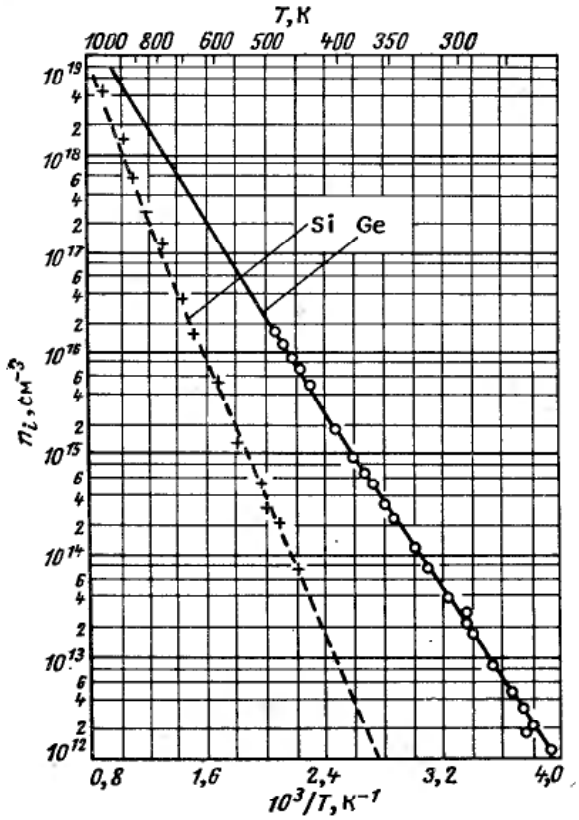


Рис. 22.24. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в Ge и Si [221]

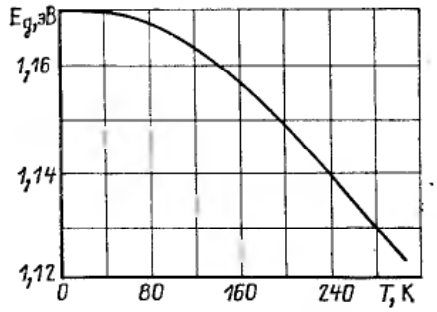


Рис. 22.25. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны Si [58]

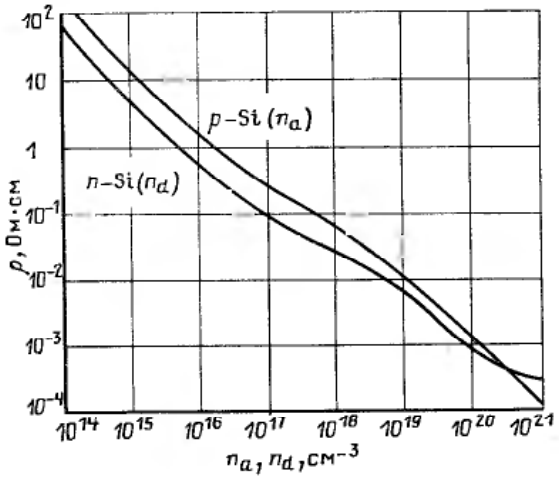


Рис. 22.26. Зависимость удельного сопротивления Si при 300 К от концентрации донорных или акцепторных примесей [63]

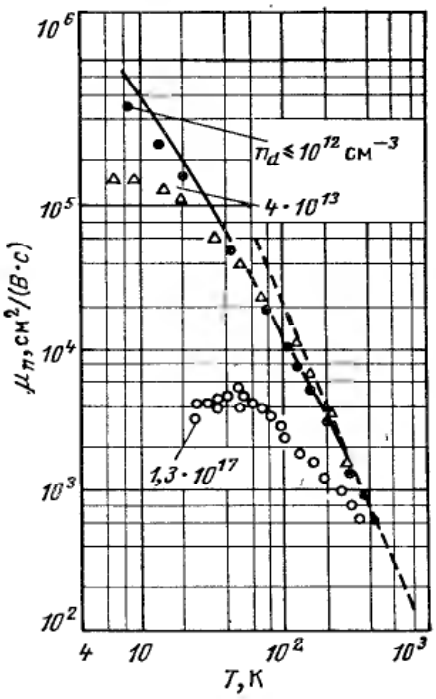


Рис. 22.27. Температурная зависимость подвижности электронов в Si при различной концентрации доноров [64]:
сплошная линия — расчет с учетом фононного рассеяния электронов; пунктир — асимптотическое приближение $T^{-2,42}$

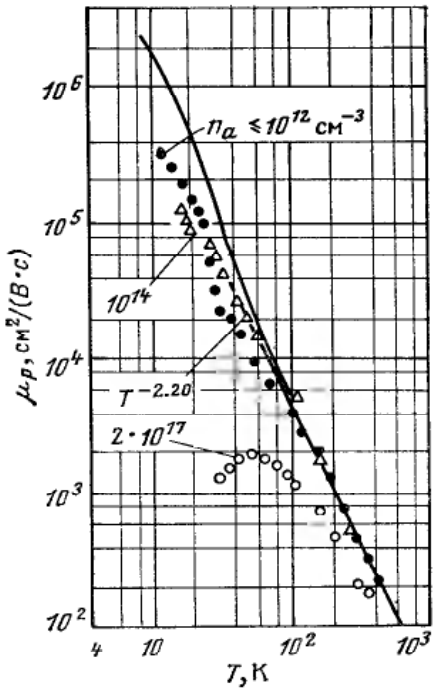


Рис. 22.28. Температурная зависимость подвижности дырок в Si при различной концентрации акцепторов [64]:
сплошная линия — расчет с учетом фононного рассеяния дырок

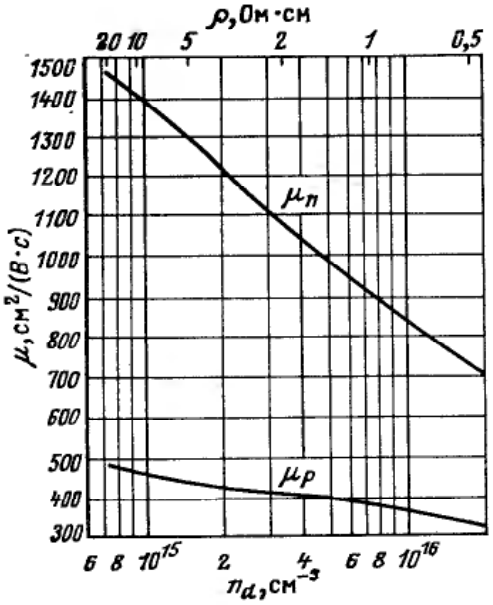


Рис. 22.29. Зависимости подвижностей электронов и дырок в Si при $T=300$ К от концентрации доноров [226]

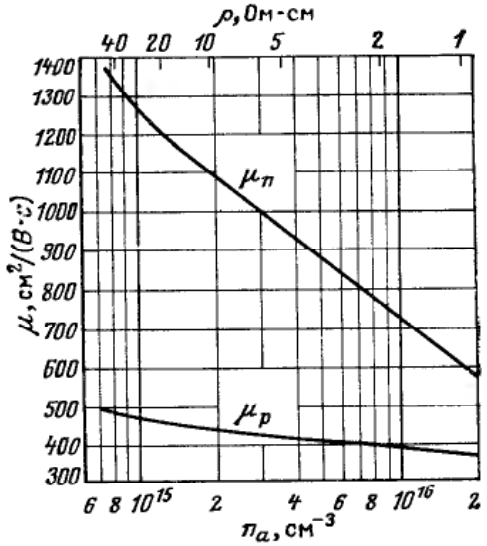


Рис. 22.30. Зависимости подвижностей электронов и дырок в Si при $T=300$ К от концентрации акцепторов [226]

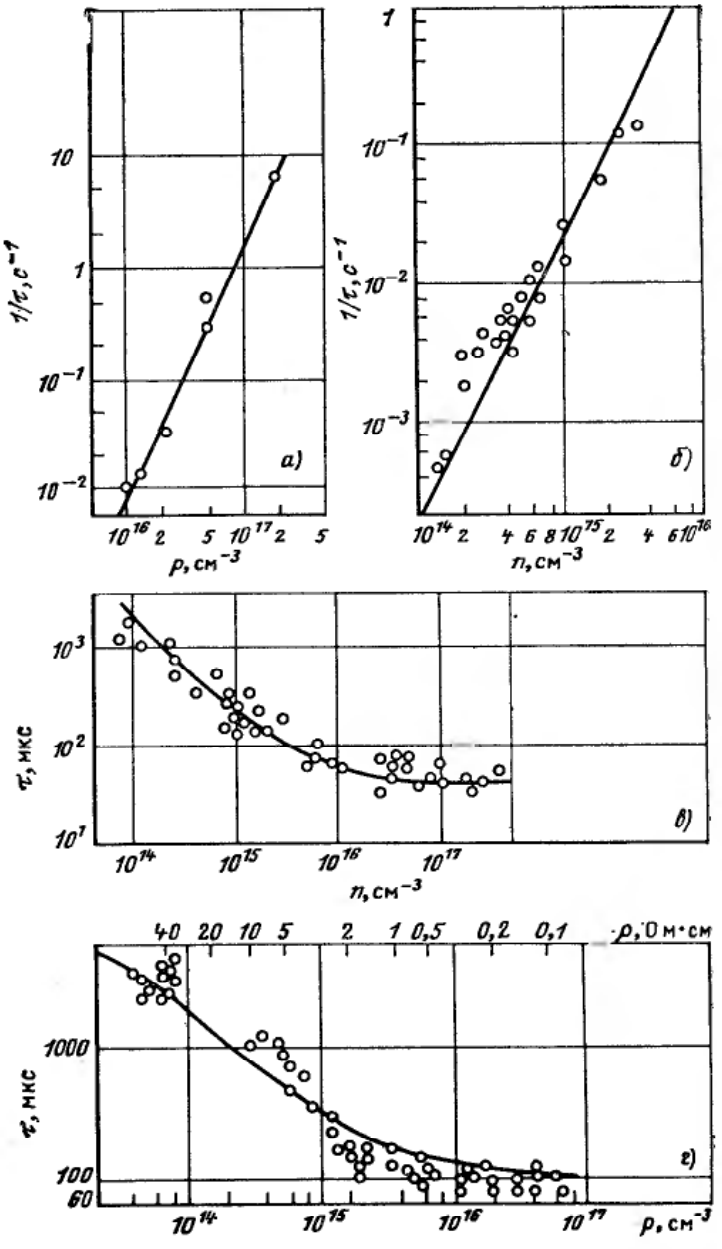


Рис. 22.31. Зависимости времени жизни неосновных носителей в n-Si (*а*), p-Si (*б*), n-Ge (*в*) и p-Ge (*г*) от концентрации основных носителей при $T=300$ К [10, 237]

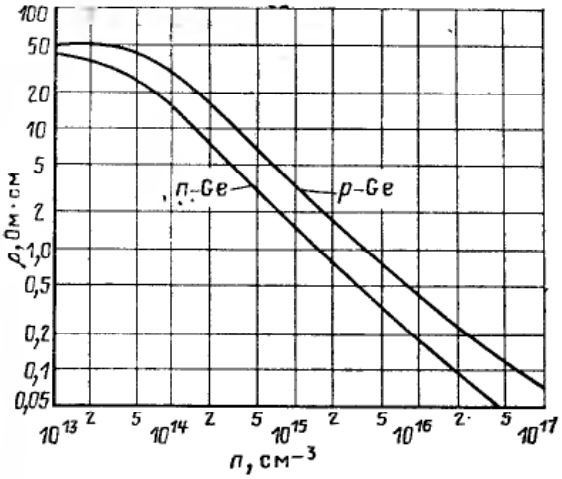


Рис. 22.32. Зависимость удельного сопротивления n- и p-Ge от концентрации носителей при $T=300$ К [234]

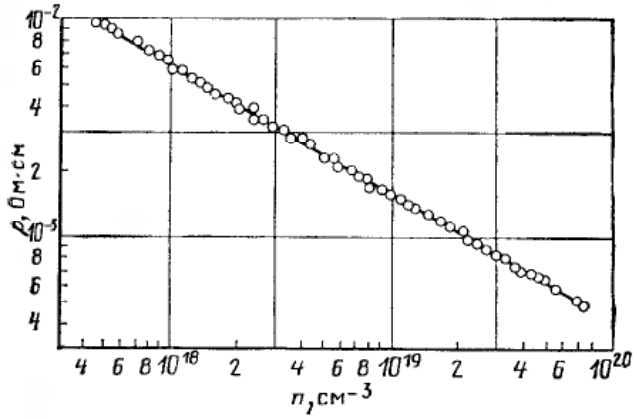


Рис. 22.33. Зависимость удельного сопротивления сильнолегированных кристаллов n-Ge от концентрации примесей при $T=300$ К [225]

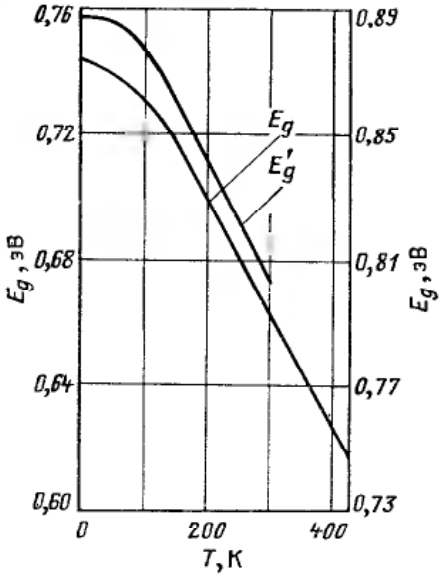


Рис. 22.34. Температурная зависимость энергии прямых E_g' и непрямых E_g переходов в Ge [65]

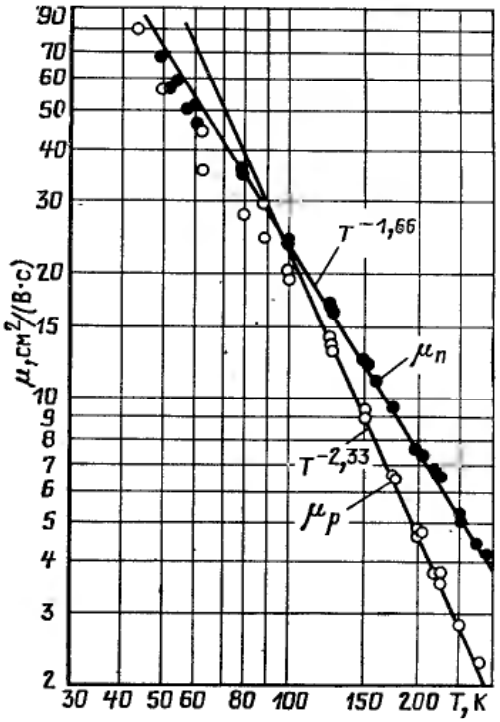


Рис. 22.35. Температурная зависимость подвижности электронов и дырок в чистом Ge при постоянной концентрации носителей [71]

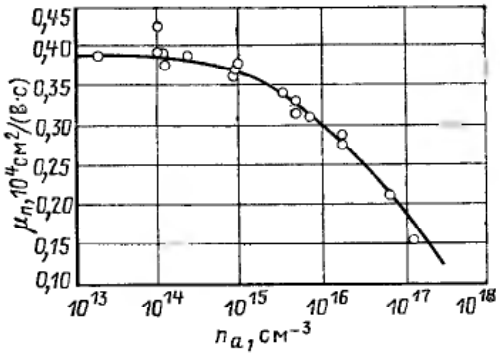


Рис. 22.36. Зависимость дрейфовой подвижности электронов в p-Ge при $T=300$ К от концентрации акцепторов: сплошная линия — расчет [72]

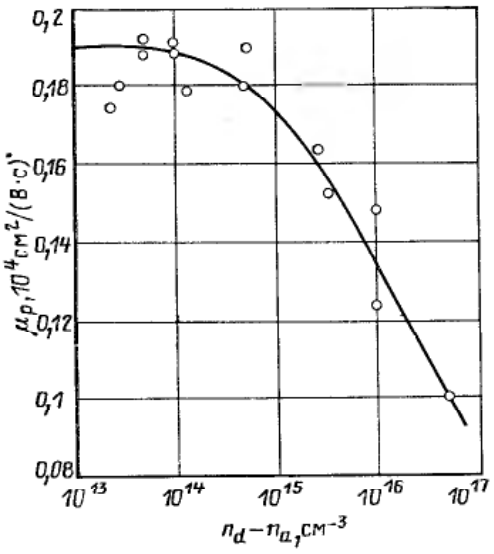


Рис. 22.37. Зависимость дрейфовой подвижности дырок в n-Ge при $T=300$ К от концентрации примесей:
сплошная линия — расчет [72]

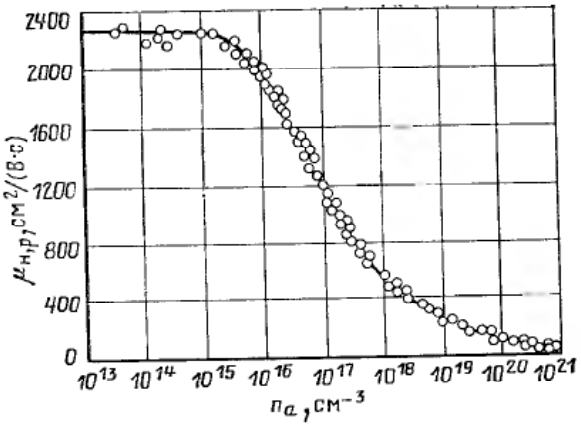


Рис. 22.38. Зависимость холловской подвижности дырок в p-Ge при комнатной температуре от концентрации акцепторов [73]

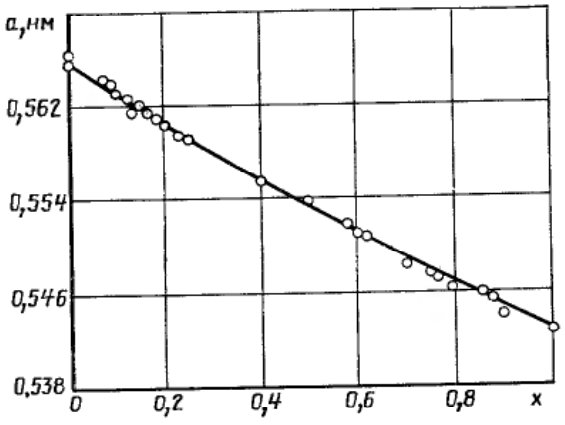


Рис. 22.39. Зависимость постоянной решетки Si_xGe_{1-x} от состава [74]

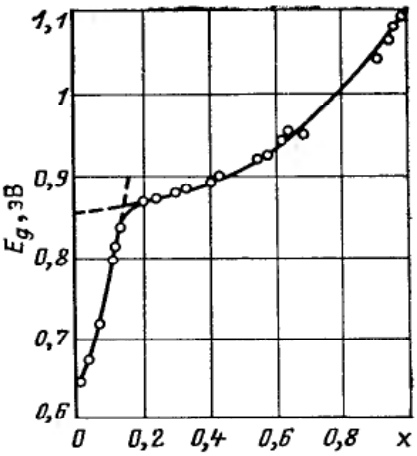


Рис. 22.40. Зависимость ширины запрещенной зоны Si_xGe_{1-x} при $T=300$ К от состава. При $x \cong 0{,}15$ происходит переход от зонной структуры Si к зонной структуре Ge [76]

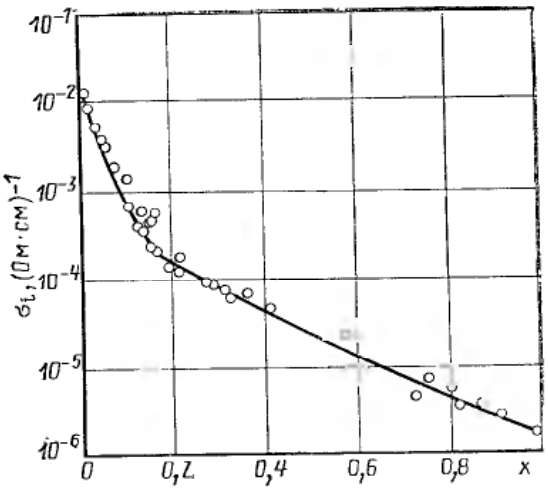


Рис. 22.41. Зависимость собственной проводимости Si_xGe_{1-x} при T=300 К от состава [80]

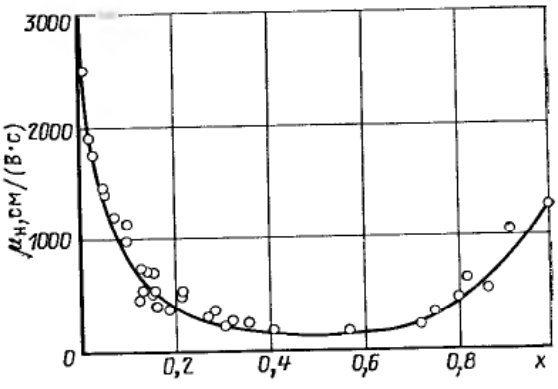


Рис. 22.42. Зависимость холловской подвижности электронов в Si_xGe_{1-x} при $T=300$ К от состава [80]

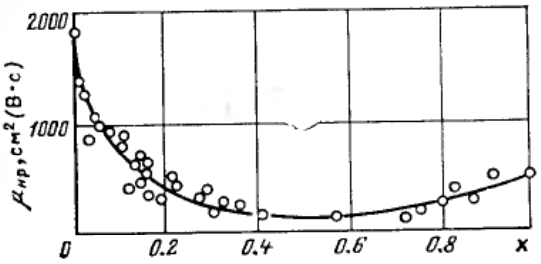


Рис. 22.43. Зависимость холловской подвижности дырок в Si_xGe_{1-x} при $T = 300$ К от состава [80]

22.3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

22.3.1. Соединения типа A^IB^I—A^IB^{VII}

22.3.2. Соединения типа $A^{II}B^{IV}$—$A^{II}B^{VII}$

Из соединений типа $A^{II}B^V$ наиболее изучены ZnSb и CdSb, а также их твердые растворы, представляющие интерес при создании термоэлектрических устройств. ZnSb и CdSb кристаллизуются в орторомбической структуре (D_{2h}^{15}), приводящей к сильной анизотропии их механических и электрических свойств. Зонная структура непрямая [18, 117]. Минимум зоны проводимости расположен в

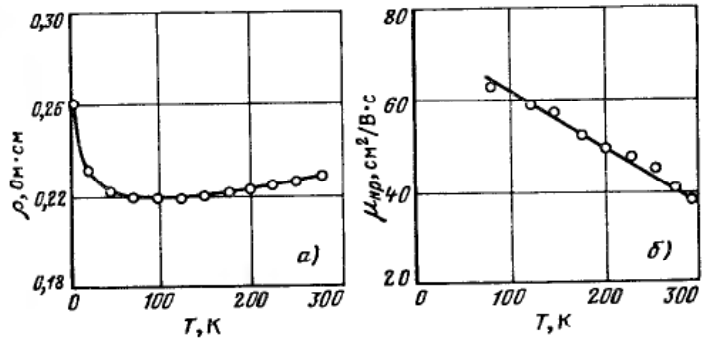


Рис. 22.44. Температурные зависимости удельного сопротивления (*а*) и холловской подвижности электронов (*б*) в CsAu (пленочный образец толщиной 130 нм) [81]

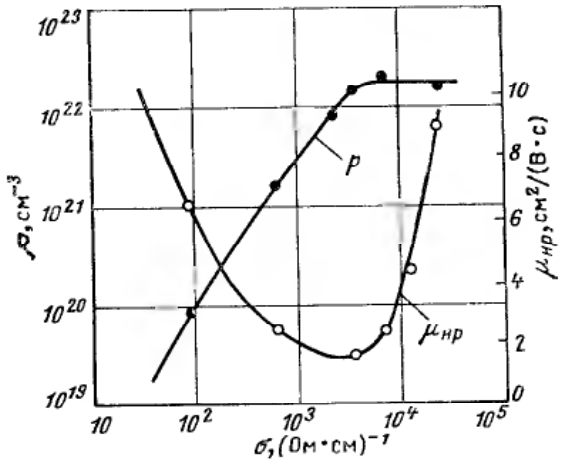


Рис. 22.45. Зависимость холловской подвижности дырок и их концентрации от проводимости пленок CsAu толщиной 270 нм с различной степенью окисления [83]

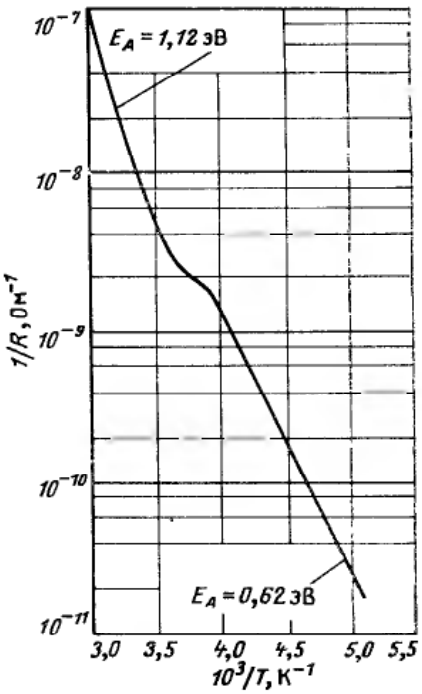


Рис. 22.46. Температурная зависимость сопротивления Cs_3Sb [89]

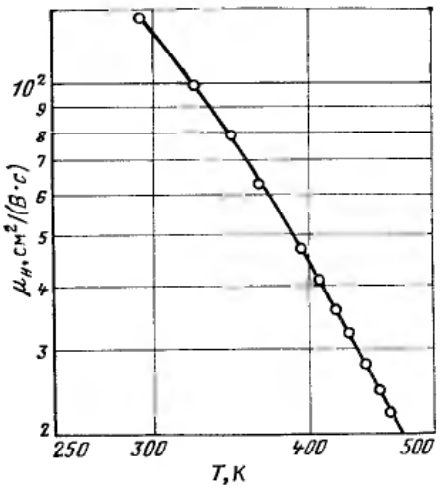


Рис. 22.47. Температурная зависимость подвижности дырок в Cu_2O [90]

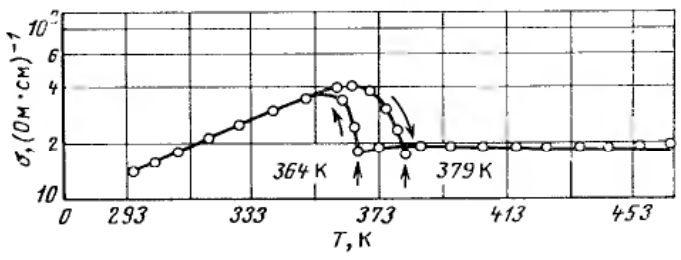


Рис. 22.48. Температурная зависимость проводимости Cu_2S [91]: стрелки, обращенные вниз и вверх, — измерения при повышении и понижении температуры соответственно

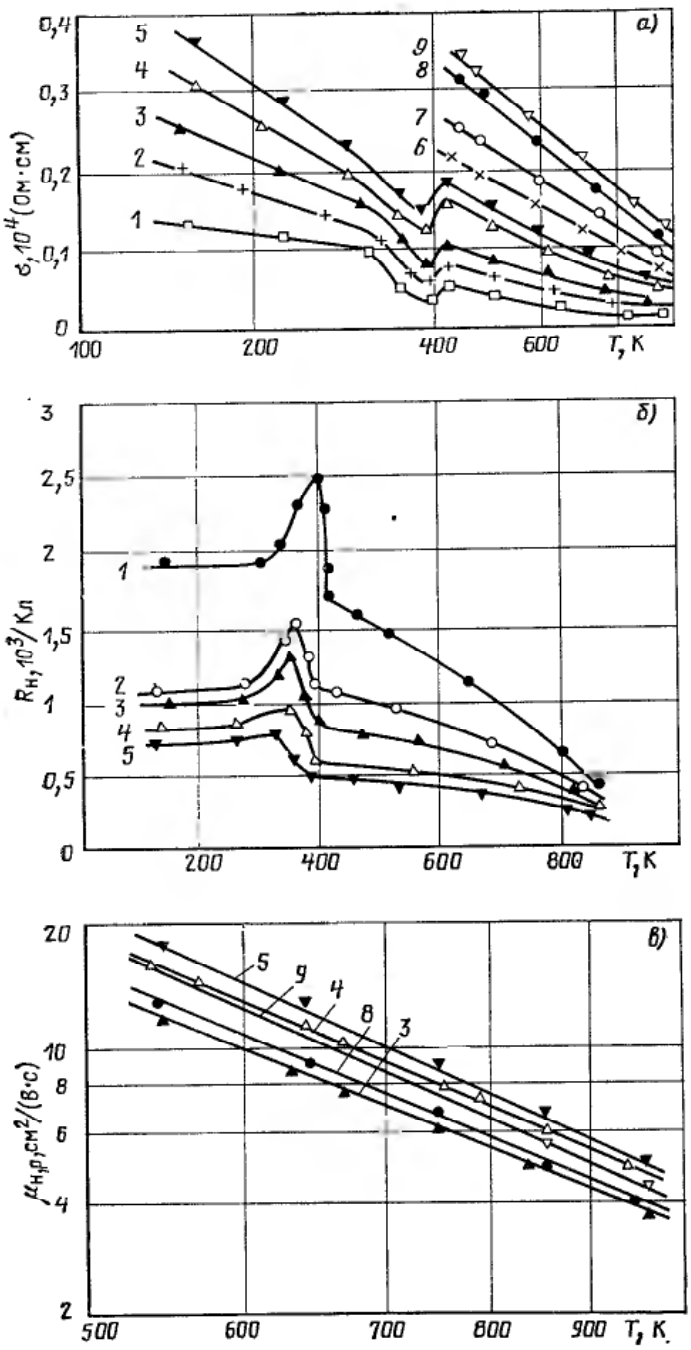


Рис. 22.49. Температурные зависимости электронной проводимости (*а*), коэффициента Холла (*б*) и холловской подвижности дырок (*в*) для различных образцов Cu_2Se [92]:

содержание Se увеличивается от образца *1* к образцу *9*, соответственно увеличивается концентрация носителей тока (от $1,9 \cdot 10^{20}$ до $24,5 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$).

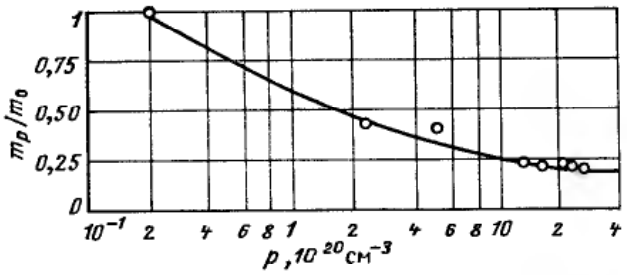


Рис. 22.50. Зависимость эффективной массы дырок в Cu_2Se от их концентрации [93]

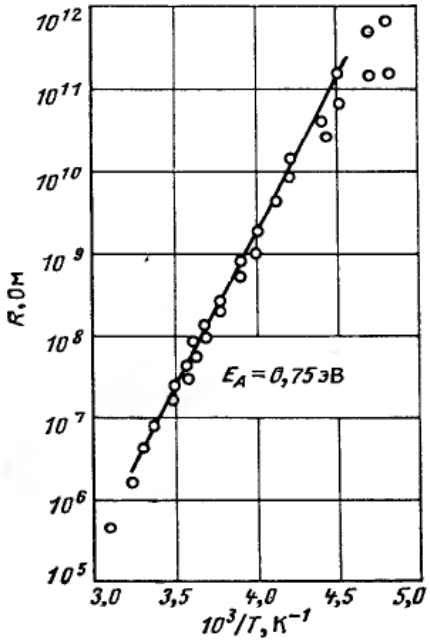


Рис. 22.51. Температуриая зависимость сопротивления Ag_2O (пленочный образец) [96]

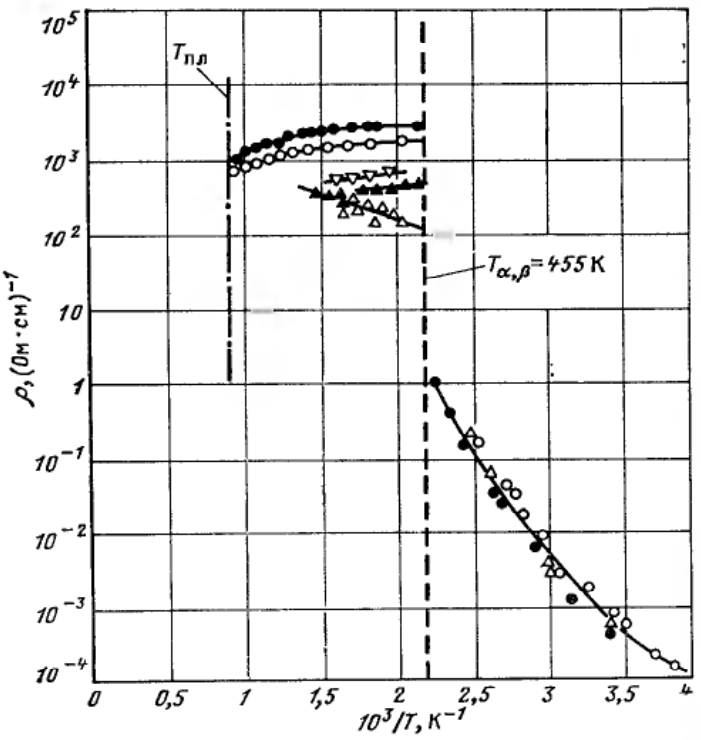


Рис. 22.52. Температурная зависимость проводимости Ag_2S [97]: различные точки соответствуют номинально чистым и стехиометрическим образцам (электрохимический контроль отношения Ag/S не проводился); для α-фазы ($T < T_{\alpha,\beta}$) существенно влияние термической предыстории различных образцов

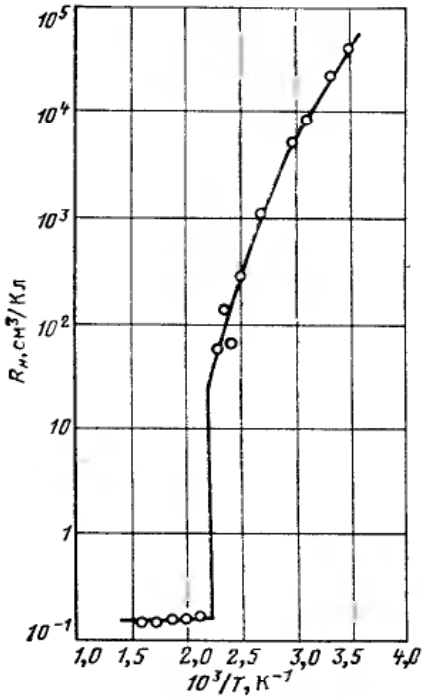


Рис. 22.53. Температурная зависимость коэффициента Холла в Ag_2S [101]

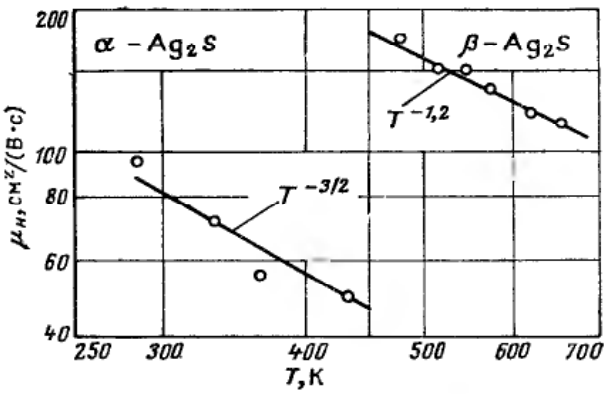


Рис. 22.54. Температуриая зависимость холловской подвижности электронов в α- и β-Ag_2S [101]

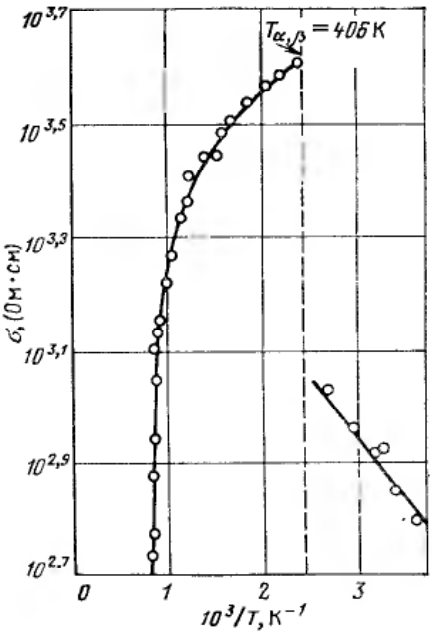


Рис. 22.55. Температуриая зависимость проводимости Ag_2Se [97]. При $T<T_{\alpha,\beta}=406$ К зависимость имеет полупроводниковый характер, при $T<T_{\alpha,\beta}$ $d\sigma/dT<0$

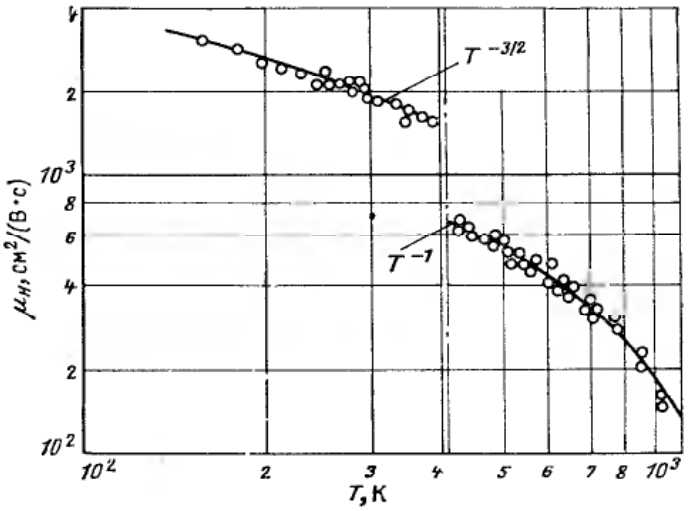


Рис. 22.56. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в Ag_2Se [101]

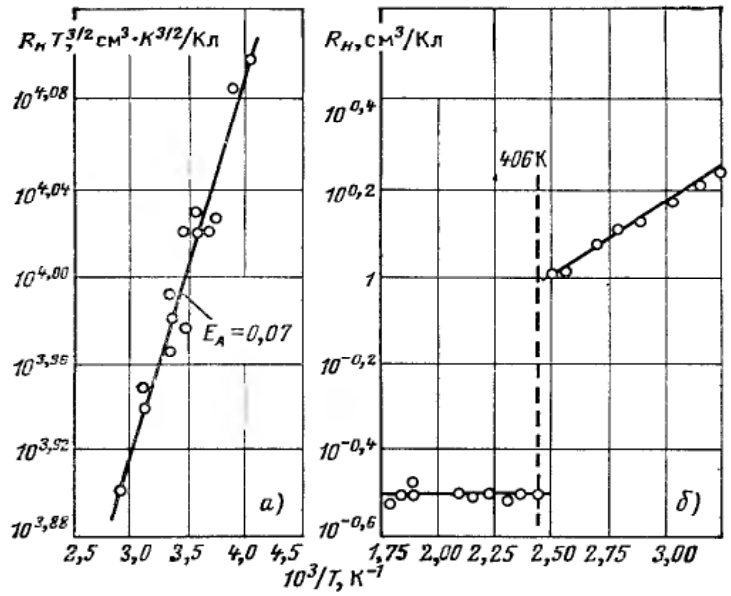


Рис. 22.57. Температурные зависимости коэффициента Холла в различных образцах Ag_2Se при низких (*а*) и высоких (*б*) температурах [101]

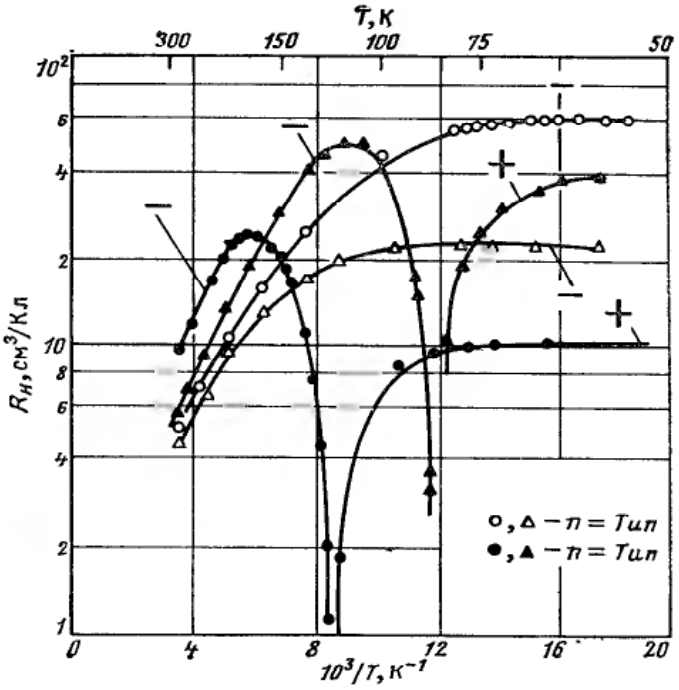


Рис. 22.59. Температуриая зависимость коэффициента Холла для различных образцов Ag_2Te [93]:
—, + — знак ЭДС Холла

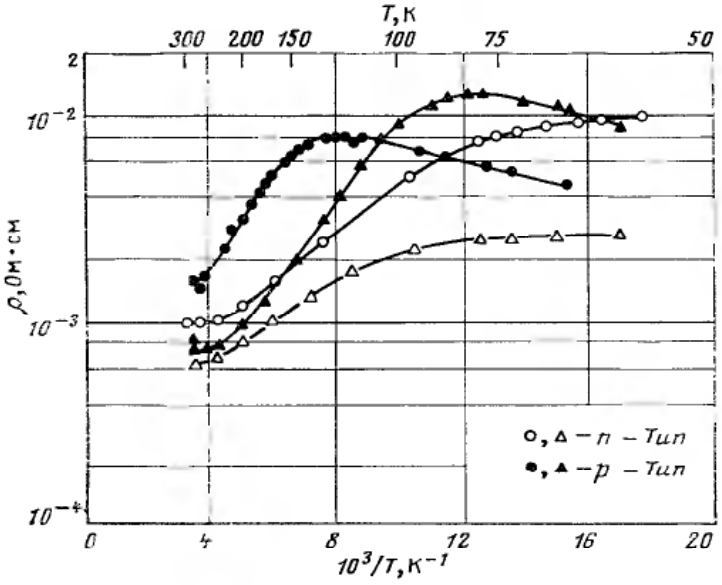


Рис. 22.58. Температурная зависимость удельного сопротивления n- и p-Ag_2Te [108]:
образцы те же, что на рис. 22.59

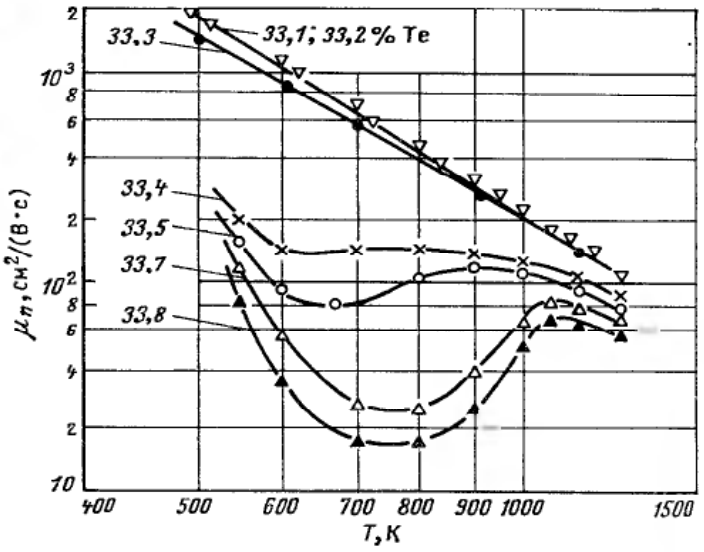


Рис. 22.60. Температурная зависимость подвижности электронов в Ag_2Te [93] при разной концентрации Te

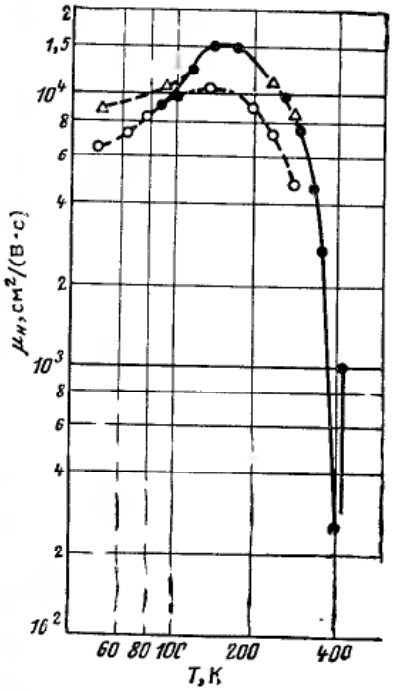


Рис. 22.61. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в Ag_2Te [123]:

○, △ — массивные кристаллы; ● — пленки толщиной 135 нм со сферолитической структурой, напыленные на подложку при температуре 120°С

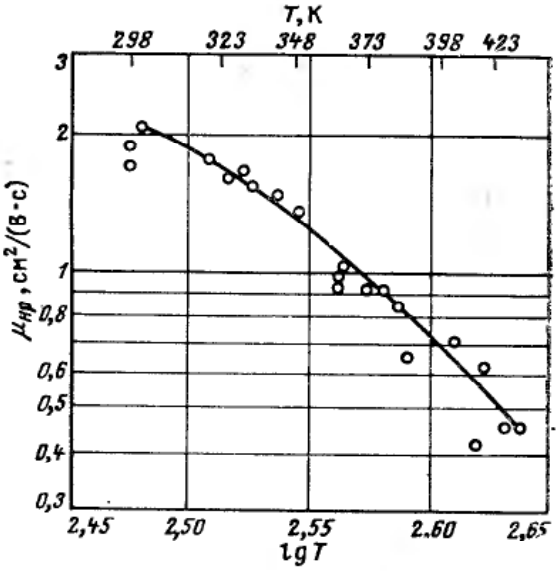


Рис. 22.63. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в AgBr [113]

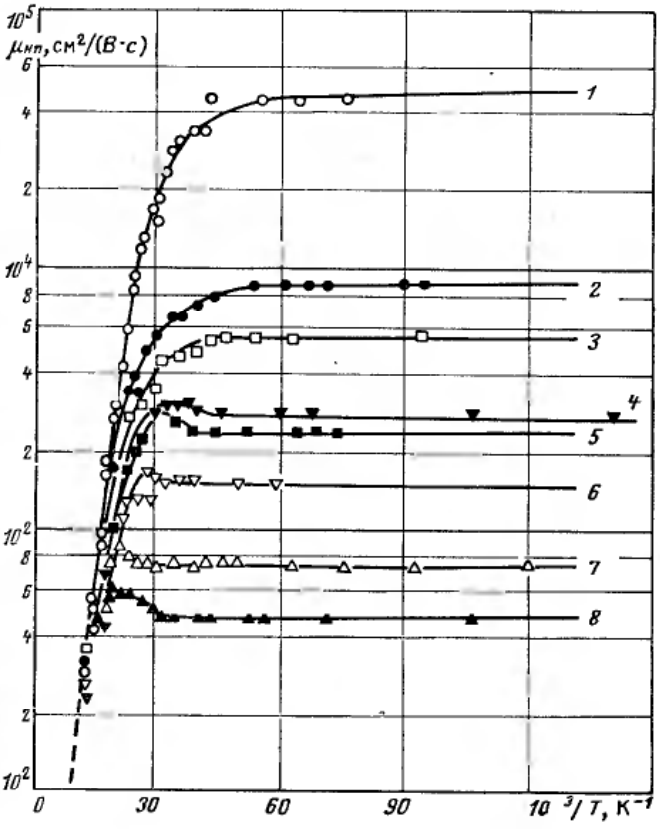


Рис. 22.62. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в чистом и примесных кристаллах AgCl:

1 — зонная очистка; *2* — примесь Cu; *3—8* — примесь Fe, различная обработка [109]

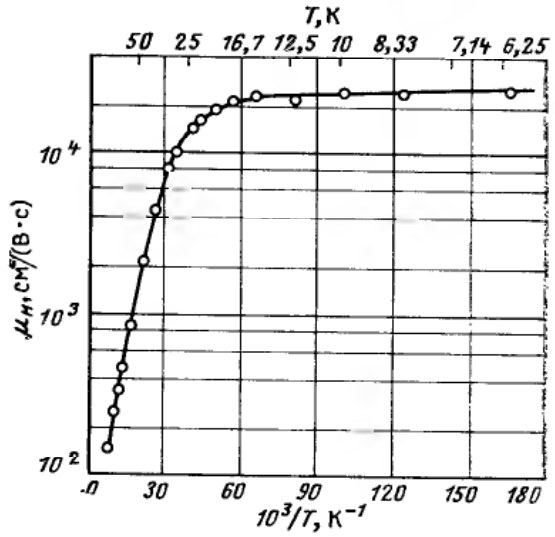


Рис. 22.64. Температурная зависимость подвижности электронов в AgBr:

сплошная линия — расчет с учетом рассеяния электронов на акустических и оптических фононах и примесях [119]

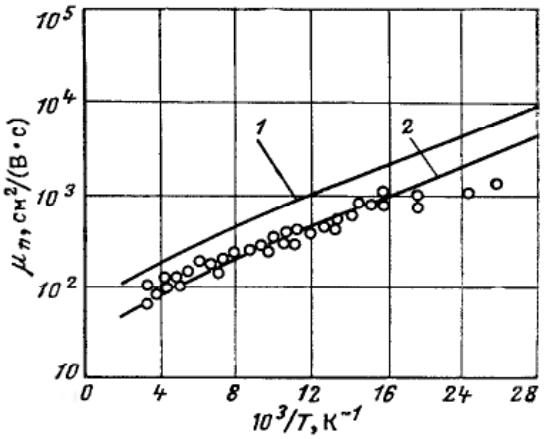


Рис. 22.65. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в AgBr:

1 — расчет с использованием измеренной массы полярона; *2* — среднеквадратичная «подгоночная» кривая [120]

Таблица 22.6. **Полупроводниковые соединения A^1B^V** [293]

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, b, c, нм	ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	μ_n, см²/(В · с)	μ_p, см²/(В · с)
β-Li_3Sb	Куб., O_h^5	0,656	3,29 [288]	923 [288]	1,4—1,6 [288] 1,25 [16]	—	—
NaSb	Моноклин., C_{2h}^5	0,680 (a); 0,634 (b); 1,248 (c); β = 117,6°	4,03 [288]	738 [16]	0,82 [16]	—	—
α-Na_3Sb	Гекс., D_{6h}^4	0,536 (a); 0,95 (c) [1]	2,67 [123]	1130 [123]	1,1 [123]	—	—
KSb	Моноклин., C_{2h}^5	0,718 (a); 0,697(b); 1,340 (c); β = 115,1°	3,52 [288]	878 [16]	0,9 [16]	—	—
α-K_3Sb	Гекс., D_{6h}^4	0,603 (a); 1,069 (c) [1]	2,35 [123]	1085 [123]	1,1 [123]	—	—
β-Rb_3Sb	Куб., O_h^5	0,884	—	1006	1,0 [10]	—	—
CsSb	Орторомб., D_2^4	0,757 (a); 0,734 (b); 1,327 (c)	—	856	0,8 [10] 0,6 [288]	500 [16] ($T^{-3/2}$)	100 [16]
Cs_3Sb	Куб., O_h^5	0,914 [1]	4,40 [288]	998	1,6 [123]	500 [10] ($T^{-3/2}$)	10 [10] 200—600 [288]
β-Cs_3Bi	То же	0,931	4,92 [288]	908	0,55 [16]	—	350 [288]

Таблица 22.7. **Полупроводниковые соединеиия A^IB^{IV}** [293]

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, b, c, нм	ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К
Cu_2O	Куб., O_h^4	0,426 [1]	6,1 [123]	1508 [16]	2,17 (4,2 К)	—2 [10]
α-Cu_2S	Ромб., C_{2v}^{15}	1,18 (a); 2,728 (b); 1,349 (c)	5,6 [216] 5,8 [288]	1393 [288] 1373 [216]	1,3	—
α-Cu_2Se	Куб., O_h^5	0,575 [288]	6,8 [216] 7,1 [288]	1390 [216] 1398 [288]	1,25 [94]	—
Cu_2Te	Гекс., D_{4h}^7	0,396 (a); 0,612 (c)	7,34 [216]	1173 [216]	0,5	—3
Ag_2O	Куб., O_h^4	0,472	6,9	1361	1,2	—20
α-Ag_2S	Моноклин.	0,423 (a); 0,691 (b); 0,787 (c); β = 99°35′	7,23	1098	1,0 [16] 1,3 (0 К)	—12
β-Ag_2S	Куб., O_h^9	0,488 [288]	7,2 [288] 6,7	859 [288]	—	—
β-Ag_2Se	То же	0,499	8,25 7,58 [288]	1170 [16]	0,15	—
AgTe	Ромб.	0,890 (a); 2,01 (b); 0,462 (c) [288]	7,61 [288]	483 [288]	0,73 [288]	—
α-Ag_2Te	Моноклин., C_{2h}^1	0,818 (a); 0,448 (b); 0,809 (c)	8,41	[216]*	0,67	—0,86 [102]
β-Ag_2Te	Куб., O_h^5	0,658	8,5 [216] 7,6 [288]	1228 [216] 963 [288]	0,2	—

Соединение	T_D, К	m_n/m_0	m_p/m_0	μ_n, см²/(В · с)	μ_p, см²/(В · с)	ε_0	ε_∞	n_i, см$^{-3}$
Cu_2O	188	0,98	0,58	0,1 [288]	100 [123]	7,5 [23]	—	—
α-Cu_2S	300 [288]	—	1,8	3,0 [242]	5,0	—	—	—
α-Cu_2Se	235 [288]	—	0,5	—	1400 [288] 750 [16]	9 [288]	11,6	—
Cu_2Te	220 [288]	0,9 [288]	0,8	200 [40] 400 [288]	900 [88] ($T^{-3,2}$)	—	17 [288]	—
Ag_2O	—	0,7	1,9	—	—	—	—	—
α-Ag_2S	70	4,55 (m_d) [15]	7,8 (m_d) [15]	63	18	—	—	$3,7 \cdot 10^{15}$
β-Ag_2S	160 [288]	0,24 [288]	—	60—120 [288]	—	—	—	—
β-Ag_2Se	190 [80 K]	0,2	0,54	2000 [16]	520	—	—	$3,2 \cdot 10^{18}$
AgTe	—	—	—	—	200 [288]	—	—	—
α-Ag_2Te	150 (80 K) [288]	0,026—0,034	—	10 000	1000	—	16 [288]	—
β-Ag_2Te	120 [288]	0,11	1,5	1100 4000 [16]	18	—	—	—

* При $T < 423$ К переходит в β-Ag_2Te [16].

Таблица 22.8. **Полупроводниковые соединения A^1B^{VII}**

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, нм	ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	μ_n, см²/(В · с)	μ_p, (см²/В · с)	m_n/m_0	m_p/m_0 [290]	ε_0 [290]	ε_∞ [290]	T_D, К [290]
CuBr	Куб., T_d^2	0,568 [1]	4,72 [121]	750 [290]	2,9 [16] 3,08 [290]	30[16]	—	0,28 [290]	1,4	8,6	4,06	163
γ-CuI	Куб., O_h^5	0,604 [290]	6,67 [290]	642 (γ → β) 681 (β → α) 875 [290]	3,1 [238]	—	—	0,33 [290]	1,4 2,4	6,5	4,6	165
AgCl	То же	0,555 [290]	5,56 [216]	728 [216]	3,0 [242] 4,1 [11]	70 (200 K) 45 000 [109] (12 K)	40 (200 K) [11]	0,30 [290] 0,36 [109]	—	11,1	3,9	161
AgBr	» »	0,577 [1]	6,47 [216]	703 [216]	2,0 [78]	240 [10] 4000 [123] 600 000 [82] (1,7 K)	2 [290] 30 000 (4,2 K)	0,29 (291)	—	12,4	4,6	120
AgI	Куб., T_d^2	0,647 [1]	5,67 [121]	825 [121]	2,8 [10]	50 [16]	—	—	—	7,0	4,1	114

Таблица 22.9. **Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{IV}$**

Соединение	Кристаллическая структура, a нм [123]	ρ, г/см³ [123]	$T_{пл}$, К [123]	E_g, эВ [293]	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К	T_D, К [293]
Mg_2Si*	0,634	1,95	1375	0,78 (0 K)	—6,4 [131]	450
Mg_2Ge*	0,639 [293]	3,086	1388	0,57 [67]	—1,8 [67]	363
Mg_2Sn*	0,676	3,592	1051	0,23 0,36 (0 K)	—3,5 [293]	240
Mg_2Pb*	0,686 [293]	5,54 [293]	828 [293]	0,15	—	244

Соединение	m_n/m_0	m_p/m_0	μ_n, см²/(В · с)	μ_p, см²/(В · с)	ε_0	ε_∞	n_i, см⁻³ [293]
Mg_2Si	0,46 (m_d) [75]	0,87 [10] 2,0 [288]	550 [293]	70 [123]	18,8 [293]	13,3 [293]	10^{14}
Mg_2Ge	0,18 (m_d) [55]	0,31 [10]	530 [293] 4335 (77 K)	110 1180 (77 K) [293]	21,7 [293]	13,9 [293]	$2\cdot10^{14}$
Mg_2Sn	0,8 ($m_\parallel$) [133] 0,3 ($m_\perp$) [133] 1,17 (m_d) [293]	1,28 [10]	320 ($T^{-2,2}$) [123]	260 [123] ($T^{-2,2}$)	23,75 [219]	15,5 [219]	$2,7\cdot10^{17}$
Mg_2Pb [293]	—	0,35 (m_p) 0,04 (m_n)	12 000 (4,2 K)	14 000	—	—	—

* Куб., O_h^5.

Таблица 22.10. **Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{V}$** [293]

Соединение	Кристаллическая структура		ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К
	Система, группа	a, b, c, нм				
Mg_3As_2	Куб.	1,233	—	1073	2,6	—9
Mg_3Sb_2	Триг., D_{3d}^3	0,454 (a); 0,723 (c) [1]	4,09 [123]	1500 [123]	0,82 [151]	—
α-Zn_3P_2	Тетр., D_4^4	0,508 (a); 1,859 (c)	3,54	1258 1313 [288]	2,18 2,0 [288]	—5,5
β-ZnP_2	Моноклин., C_{2h}^5	0,885 (a); 0,729 (b); 0,756 (c)	3,55	1265	1,37	—
Zn_3P_2	Тетр., D_{4h}^{15}	0,81 (a); 1,145 (c) [2]	4,54 [16]	1466	1,15 [10]	—
$ZnAs_2$	Моноклин., C_{2h}^5	0,921 (a); 0,764 (b); 0,798 (c); $\beta = 102°28'$	4,94	1041 [133]	0,92 [16]	—
Zn_3As_2	Тетр., D_{4h}^{15}	1,178 (a); 2,364 (c)	5,58 [123]	1288	1,0 (0 K)	—4,55
ZnSb	Орторомб., D_{2h}^{15}	0,622 (a); 0,774 (b); 0,812 (c); [117]	6,38 [117]	819 [117]	0,5; 0,61 (4,2 K) [103]	—
β-Zn_4Sb_3	Моноклин., C	1,074 (a); 1,22 (b); 0,820 (c)	6,81	836	1,2 [16]	—
CdP_4	Моноклин., C_{2h}^5	0,527 (a); 0,519 (b); 0,766 (c); $\beta = 80°32'$	2,04 3,90 [288]	—	1,0 [111]	—(2,7—3,7)
β-CdP_2	Тетр., D_{4h}^{15}	0,529 (a); 1,974 (c)	4,19	1057	2,02	—8,6
Cd_3P_2	Тетрагон., D_{4h}^{15}	1,256 (a); 2,544 (c)	5,60 [123]	970 [123] 1015 [288]	0,55 [54]	—1,8
$CdAs_2$	Тетрагон., D_4^{10}	0,795 (a); 0,468 (c)	5,88 5,64 [288]	894 [133]	1,13 [16] 1,0 [15]	—
α-Cd_3As_2	Тетрагон., C_{4v}^{12}	1,265 (a); 2,544 (c)	6,25 [123]	994 [133]	0,12 (0 K)	—3,3
CdSb	Орторомб., D_{2h}^{15}	0,647 (a); 0,824 (b); 0,853 (c) [117]	6,92 [117]	729 [133]	0,56 [117]	—5,4 [117]
β-Cd_4Sb_3	Моноклин., D_{2h}^{13}	0,815 (a); 0,816 (b); 1,196 (c)	—	703	1,25 [16]	—5,4 [288] —3,6

Соединение	T_D, К	m_n/m_0	m_p/m_0	μ_n, см²/(В · с)	μ_p, см²/(В · с)	ε_0
Mg_3As_2	—	—	—	10—20	—	—
Mg_3Sb_2	—	3,1 (m_d)	—	—	100 ($\sim T^{-3,2}$)[10]	—
α-ZnP_2	465 [288]	—	—	1800	—	—
β-ZnP_2*1	288 [288]	—	—	3,5	20 [288] 1000 (77 К) [288]	—
Zn_3P_2*2	320 369 (160 К)	—	—	—	100 [288] 20	—
$ZnAs_2$	234 284 (55 К)	0,35 [288]	2,45 [288]	500	100	12—15
Zn_3As_2	290 275 (120 К)	1,7 [16]	0,65 [16]	$10 \cdot (T/300)^{-1,1}$ [135]	17 ($\sim T^{-1,64}$) [16]	11,8
ZnSb*3	225 (80 К) [117]	0,175 ($m_{\parallel}$) [117] 0,146 ($m_{\perp}$)	0,53 [18]	800 (100 К)	700($\sim T^{-3/2}$) [50]	—
β-Zn_4Sb_3	—	0,16 [288]	0,12	330	980 [16]	—
CdP_4	—	—	—	150 [111]	600 [288]	—
β-CdP_2	—	—	—	—	—	—
Cd_3P_2*4	251 235 (55 К)	0,09 [77] 0,05 [188] $g_n = 2,15$	0,5	3000 ($T^{-1,1}$) [54]; $5 \cdot 10^4$ (4,2 К)	—	37
$CdAs_2$*5	233 (55 К)	0,15 ($m_{\parallel}$) [133] 0,58 ($m_{\perp}$) 0,37 (m_d)	0,094 ($m_{\parallel}$) [133] 0,346 ($m_{\perp}$) 0,22 (m_d)	100—400 [133] 3000 [288]	400 [133]	15,4—17,4

Соединение	T_D, К	m_n/m_0	m_p/m_0	μ_n, см²/(В · с)	μ_p, см²/(В · с)	ε_0	ε_∞
α-Cd_3As_2*6	258 [288]	0,046 (m_d); g_n=17÷30,2 [52]	0.12	$2,6 \cdot 10^4$; $2,8 \cdot 10^4$ (4,2 К)	430 [16]	42	16
CdSb	180 (80 К) [117]	0,72	0,34—0,4 1,07	660	2000 [117] ($\sim T^{-3/2}$)	16,4	—
β-Cd_4Sb_3	—	0,1—0.2 [288]	0.35 [288]	1000 [288]	110 900 [288]	—	—

*1 Анизотропия сопротивления $\rho_a : \rho_b : \rho_c = 5 : 35 : 1$.
*2 $n_i = 3,56 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$.
*3 $n_i = 10^{15}$ см$^{-3}$.
*4 $\varepsilon_\infty = 14 \div 17$.
*5 $\varepsilon_\infty = 11,5 \div 13,8$.
*6 $\varepsilon_\infty = 16$.

Таблица 22.11. **Параметры валентной зоны соединений типа $A^{II}B^{VI}$** [138, 289]

Соединение	Δ_{so}, эВ	Δ_{cr}, эВ	E_1, эВ	E_2, эВ	Соединение	Δ_{so}, эВ	Δ_{cr}, эВ	E_1, эВ	E_2, эВ
Сфалерит					*Вюрцит*				
ZnS	0,06—0,07	—	—	—	ZnO	—	—	0,007 [159]	0,052 [159]
ZnSe	0,43	—	—	—	ZnS	0,092	0,055	0,029	0,117
ZnTe	0,9—0,96	—	—	—	CdS	0,065	0,027	0,015	0,025
CdTe	0,8—0,9	—	—	—	CdSe	0,42	0,041	0,078	0,433
HgSe	0,40—0,45	—	—	—					
HgTe	0,94—1,1	—	—	—					

Таблица 22.12. Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, c, нм	ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К
ZnO	Гекс., C_{6v}^4	Вюрцит*1, 0,325 (a); 0,591 (c) [290]	5,60 [121] 5,66 [123]	2248 [123]	3,35 [144] 3,43 [66]	—8 [144]
ZnS	Куб., T_d^2	Сфалерит*2, 0,541 (a)[138]	4,10 [140]	2103 [236]	3,54*3 [123] 3,6 [114] 3,67(w) [138] 3,91(w) [123]	—5,3*3 [114] —3,8 (w)
ZnSe	То же	Сфалерит, 0,5668 (a) [138]	5,42 [121]	1788 [123]	2,7 [114] 2,8 [138]	—4,5 [289]
ZnTe	» »	Сфалерит, 0,6104 (a) [138]	5,68 [141]	1512 [123]	2,1 [47] 2,34 [142]	—4,1 [289] —5 [290]
CdO	Куб., O_h^5	0,470 [1]	8.15 [216]	1099 [288]	2,3 [123] 2,68 [59]	—6 [59]
CdS	Гекс., C_{6v}^3	Вюрцит*1, 0,4136 (a); 0,6713 (c) [138]	4,82 [139]	2023 [123]	2,52*3 [142] 2,4 (s) [214]	—4,4 [138]
CdSe	То же	Вюрцит*1, 0,430 (a); 0,701 (c) [138]	5,81 [139]	1531 [123]	1,67 [138] 1,8 [114]	—4,6 [144]
CdTe	Куб., T_d^2	Сфалерит, 0,648 (a) [138]	5,86 [139] 6,20 [121]	1371 [123]	1,5 [237] 1,6 (77 К)	—3,0 [68] —5,6 [288]
α-HgS	Триг., D_3^6	0,414 (a); 0,949 (c) [288]	8,09 [288]	618 [288]	2,1 [290]	—
β-HgS	Куб., T_d^2	0,585 (a) [290]	7,73 [290]	1098 [288]	0,15 [289]	—
HgSe	То же	0,608 (a) [138]	8,26 [139]	1071 [123]	0,2 [148]; 0,22 [156]:	5 [289]
HgTe	» »	0,646 (a) [138]	8,09 [289]	943 [123]	0,115 [33] 0,259 (77 К) [33]; 0,302 (4,2 К) [38]	7 [289]

Соединение	g_n	g_p*4	T_D, К	$\hbar\omega_l$, эВ	$\hbar\omega_t$, эВ	$\langle\varepsilon_0\rangle$*5	$\langle\varepsilon_\infty\rangle$*5
ZnO	—1,94 [155]	—(1,24—1,74) [155]	416 [141]	0,0732 [254] 0,605 [220]	0,0512 [254] 0,0545 [220]	8,5 [159]	4,0 [159]
ZnS	1,88 [289] 2,0 ($\parallel c$) (w) 2,3 ($\perp c$) [138]	1,04 [148] ~1,5 [289]	310 [140]	0,044 [138]	0,0367 [138] 0,0394 (w)	8,54 [289] 8,32 [138]	5,2 [289] 5.13 [138]
ZnSe	1,46 [148]	5,25 [148]	400 (80 К) [144]	0,031 [138]	0,0263 [138]	9,1 [138] 9,73 [289]	5,9 [138] 7,18 [289]
ZnTe	1,14—1,37 [289] —0,38 [289] —0,57	0,9—1,1 [289]	250 (80 К) [114]	0,026 [138]	0,024 [138] 0,0219 [254]	10,1 [138] 9,67 [142]	7,28 [138] 8,26 [114]
CdO	1,81 [201]	—	415 [288]	0,0654 [254]	0.0325 [254]	21,9 [254]	5,4 [254] 5,3 [290]
CdS	1,78 ($\parallel c$) [138] 1,72 ($\perp c$)	1,15 ($\parallel c$) [138] 1,00 [148]	250—300 [114]	0,038 [138]	0,0324 [138] 0,0301 [254]	9,3 [138] 8,5 [289]	5,2 [138]
CdSe	0,6 ($\parallel c$) [138] 0,51 ($\perp c$)	$g_p - g_n = 1,8$ ($\parallel c$) [289]	230 (80 К) [114]	0,027 [138]	0,0263 [138] 0,0172 [254]	9,4 [138] 9,63 [138]	5,98 [138] 6,10 [142]
CdTe	—1,1 [202]	—2 ($\parallel c$) [138]	200 (80 К) [114] 160 [236]	0,0212 [138]	0,0173 [138]	10,6 [138] 10,29 [289] 11,0 [161]	7,6 [114] 7,21 [138] 7,19 [289]
α-HgS	—	—	—	—	—	—	—
β-HgS	—	—	—	—	0,022 [289]	18,2 [290]	11,3 [289]
HgSe	—14 [289] —36 [157]	—	242 [114]	—	0,015 [289]	25,6 [114]	7,2 [289] 11
HgTe	—22 [289] —25 [157]	6 ($\parallel$ [100]) [289] 4 ($\parallel$ [110]) 3 ($\parallel$ [111]) —41*6	143 [288]	0,0171 [252]	0,0146 [252]	21 [252]	14 [138]

Соединение	$\partial E_g/\partial P$ 10^{-11} эВ/Па (10^{-6} эВ/ат)	m_n/m_0	m_p/m_0	μ_n, см²/(В · с)	μ_p, см²/(В · с)
ZnO	0,6—1,9 [10]	0,27 [123]	0,59 (v_1, v_2) [280] 0,31—0,55 (v_3)	180 [123] 1000 [288]	—
ZnS	5,6*³ [114] 9 (w)	0,34—0,39 [289] 0,27 (w)*³ [138]	$m_d/m_0 = 0,6$ [15] 1,4 ($\parallel c$, w)*³ [289] 0,49 ($\perp c$, w)	140 [138] 200 [16]	5 (700 K) [138]
ZnSe	6 [114]	0,15—0,17 [114] 0,18 [142]	0,6 [138] 0,75 [289]	260 (300—550 K) 530 [114, 138] 6000 (55 K) [153]	15 (200—400 K) [114] 23 [154]
ZnTe	6 (114)	0,12 [289]	0,65 [181] 0,15*⁷ [229]	350 ($\propto T^{-3/2}$) [114] 340 [138]	100 ($\propto T^{-3/2}$) [16] 110 [138]
CdO	—	0,1 [143] 0,3	—	120 [86] 500 [288]	—
CdS	3,3 [123]	0,18—0,20 0,18 (s)*³ [289]	5,0 ($\parallel c$) [138] 0,7 ($\perp c$) $m_d/m_0 = 1,34$ [21]	350 [138] 64000 · $T^{-3/2}$ [138] (50—200 K)*³ 20 ($\propto T^{-3/2}$) (s)*³ [114]	15 [138] 50 [46]
CdSe	4 [290]	0,11—0,13 [289] 0,10—0,12 (s)*³	>7 ($\parallel c$, v_1) [138] 0,45 ($\perp c$, v_1) [138] 0,9 ($\perp c$, v_2) [22] $m_d/m_0 = 0,63$ (v_1) [138]	580 [114] 650 [138]	50 [114]
CdTe	3,0 [218] 7,9 [290]	0,10—0,12 [289]	0,1*⁷ [289] 0,4*⁸	1200 [121] 3000 (77 K) [121] 57 000 (30 K) [149]	80 ($\propto T^{-3/2}$) [114] 50 [121] —
α-HgS	—	—	—	45 ($\parallel c$) [289] 13 ($\perp c$)	— —
β-HgS	—	0,028 [289]	—	10 000 (77 K) [289] 100 000 (4,2 K)	— —
HgSe	5 [289]	0,050 [156]	0,17 [84] 0,55 [112]	20 000 [289]	
HgTe	10 [84]	0,017 0,03 (4,2 K) [84]	0,16 0,35 (4,2 K) [84]	33 000 100 000 (77 K) [289] 900 000 (4,2 K)	— —

Соединение	ε_{011} [138]	ε_{033} [138]	$\varepsilon_{\infty 11}$ [138]	$\varepsilon_{\infty 33}$ [138]
ZnO	7,8 ($\perp c$) [290]	8,75 ($\parallel c$) [290]	3,7 ($\perp c$) [290]	3,75 ($\parallel c$) [290]
ZnS	—	—	5,13	—
ZnSe	—	—	5,9	—
ZnTe	—	—	7,28	—
CdO	—	—	—	—
CdS	9,02	9,53	5,17	5,23
CdSe	10,2	9,33	5,96	6,05
CdTe	—	—	7,21	—
α-HgS	18,2 [290]	23,5 [290]	6,25 [290]	7,9 [290]
β-HgS	—	—	—	—
HgSe	—	—	—	—
HgTe	—	—	—	—

*¹ Может кристаллизоваться в структуре типа сфалерита.
*² Может кристаллизоваться в структуре типа вюрцита.
*³ Знаками s, w помечены данные, относящиеся к модификациям типа сфалерита и вюрцита. Непомеченные данные относятся к основной модификации.
*⁴ Тяжелые дырки.
*⁵ Значение, усредненное по кристаллографическим направлениям.
*⁶ Легкие дырки.
*⁷ Масса легких дырок.
*⁸ Масса тяжелых дырок.

Таблица 22.13. **Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{VII}$** [293]

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, b, c, нм	ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К	m_n/m_0
β-HgI_2	Орторомб., C_{2v}^{12}	0,467 (a); 1,376 (b): 0,732 (c) [1]	6,09	532	2,39	—(7—14)	0,25 ($m_{\|\|}$) 0,29 ($m_\perp$)
CdF_2	Куб., O_h^5	0,539 [1]	—	—	6,05 [26]	—	0,4 [26]
CdI_2	Гекс.	0,424 (a); 0,683 (c)	5,67	660	3,47	—12	—

Соединение	m_p/m_0	μ_n, см²/(В · с)	μ_p, см²/(В · с)	ε_0	ε_∞
β-HgI_2	1,72 ($m_{\|\|}$) 0,56 ($m_\perp$)	100	—	8,5—25,9 (анизотропна)	5,1—6,8 (анизотропна)
CdF_2	—	19 [26]	—	—	—
CdI_2	—	—	—	5,9—12,9 (анизотропна)	4,3—4,6 (анизотропна)

центре зоны Бриллюэна (при $\mathbf{k}=0$). Вблизи него поверхность постоянной энергии близка к эллипсоиду вращения с большой осью, направленной вдоль оси a. Экстремум валентной зоны расположен в точке $\mathbf{k}\neq 0$. Обзор свойств соединений типа $A^{II}B^{V}$ см. в [241].

Все соединения типа $A^{II}B^{VI}$ являются фазами переменного состава. Полиморфизм и политипизм, свойственные многим из них, приводят к сильной зависимости структурно чувствительных свойств от условий выращивания кристалла и термической обработки.

Наиболее изученные полупроводники кристаллизуются в решетках типа сфалерита T_d^2 или вюрцита C_v^4 и имеют прямую зонную структуру (экстремумы зоны проводимости и валентной расположены в точке $\mathbf{k}=0$). Кристаллы кубической структуры (сфалерит) изотропны; одна из подзон их валентной зоны отщеплена за счет спин-орбитального взаимодействия Δ_{so} (см. рис. 22.97). Кристаллы гексагональной структуры (вюрцит) слабо анизотропны (этой анизотропией часто пренебрегают); наличие дополнительного взаимодействия Δ_{cr} (кристаллическое поле некубического кристалла) приводит к расщеплению валентной зоны на три подзоны (см. рис. 22.98). Экспериментально определяемые оптическими методами расщепления E_1 и E_2 связаны с Δ_{so} и Δ_{cr} соотношениями [138]

$$E_{1/2}=\frac{1}{2}\left(\Delta_{so}+\Delta_{cr}\right)\mp\left[\frac{1}{4}\left(\Delta_{so}+\Delta_{cr}\right)^2-\frac{2}{3}\Delta_{so}\Delta_{cr}\right]^{1/2}.$$

HgS, HgSe и HgTe имеют сложную зонную структуру с перекрывающимися зонами (см. рис. 22.99). Перекрытие порядка $E_t\sim 0{,}001$ эВ [199, 200] (по другим данным $E_t=0{,}02$ эВ (HgTe); 0,07 эВ (HgSe) [138]).

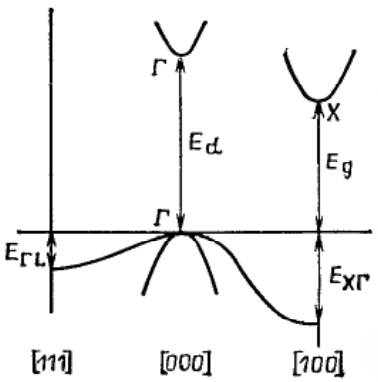
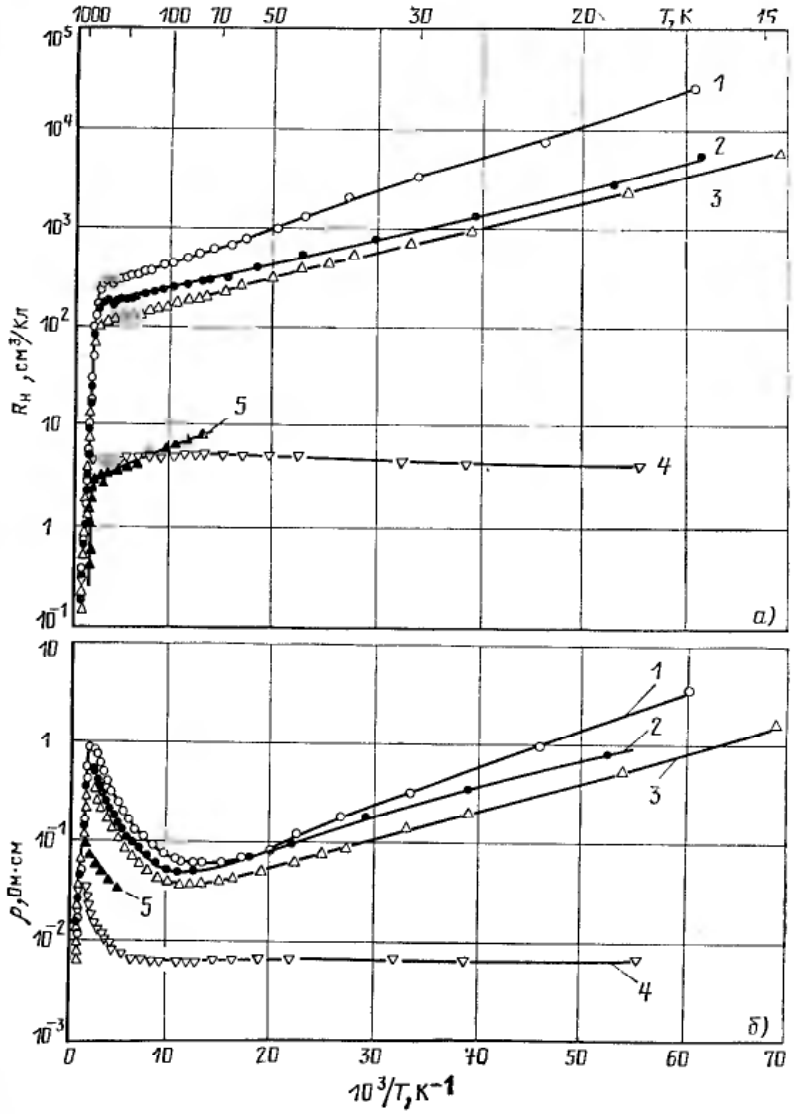


Рис. 22.66. Зонная структура Mg_2Si, Mg_2Ge, Mg_2Sn [123, 129, 130, 293]



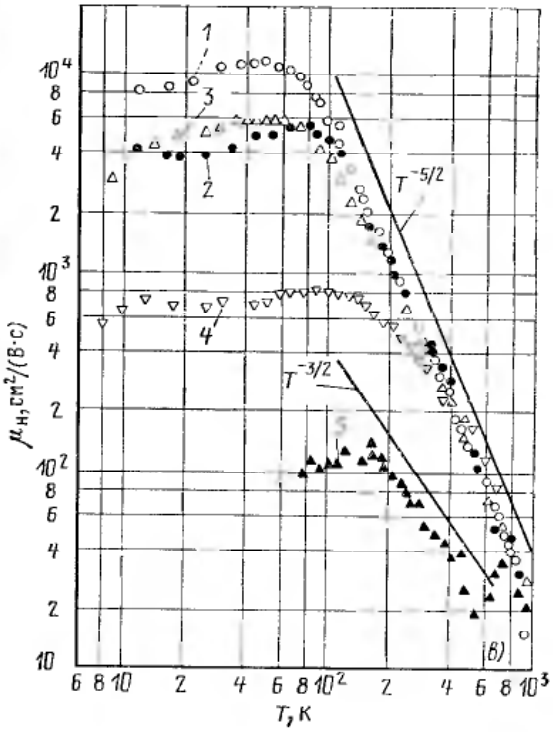


Рис. 22.67. Температурные зависимости коэффициента Холла *(а)*, удельного сопротивления *(б)* и холловской подвижности электронов и дырок *(в)* в образцах Mg_2Si *n*-типа *(1—4)* и *p*-типа *(5)* [134]. Концентрация носителей $n = 2{,}8 \cdot 10^{16} \div 1{,}7 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ (увеличивается от *1* к *4*) и $p = 2{,}2 \cdot 10^{18}$ см$^{-8}$ соответственно

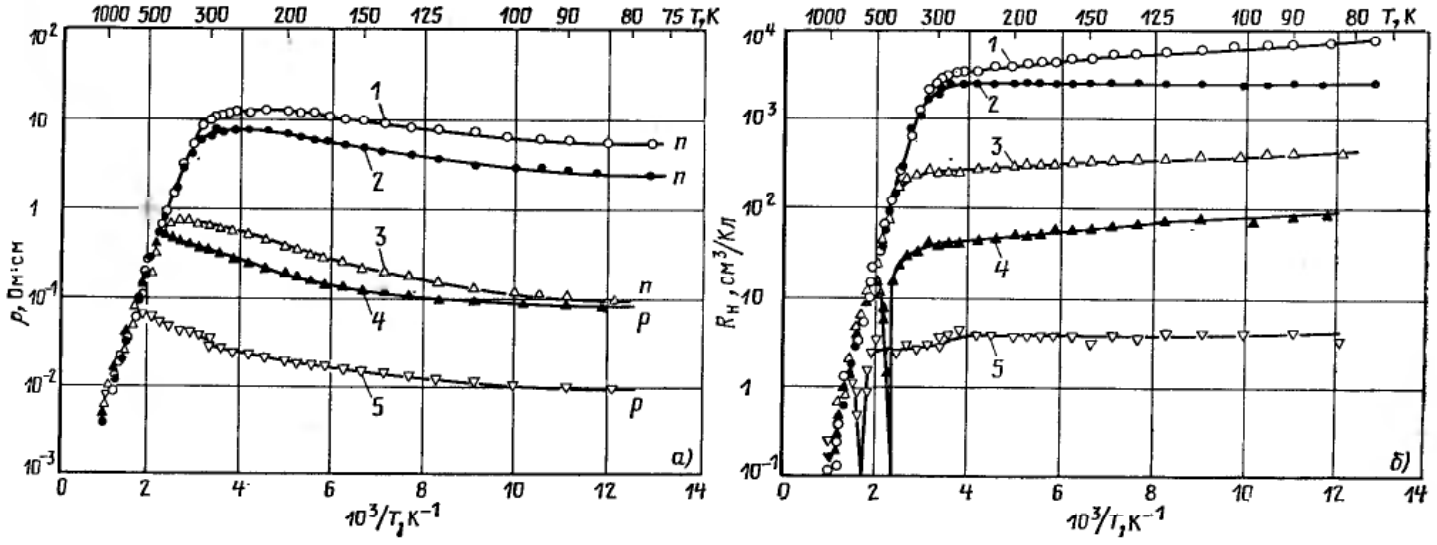
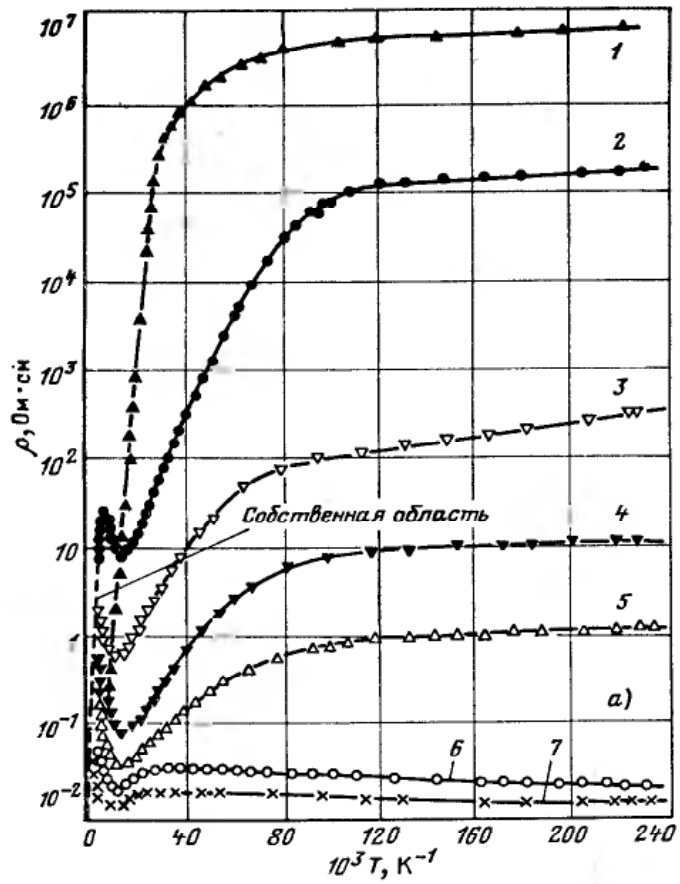
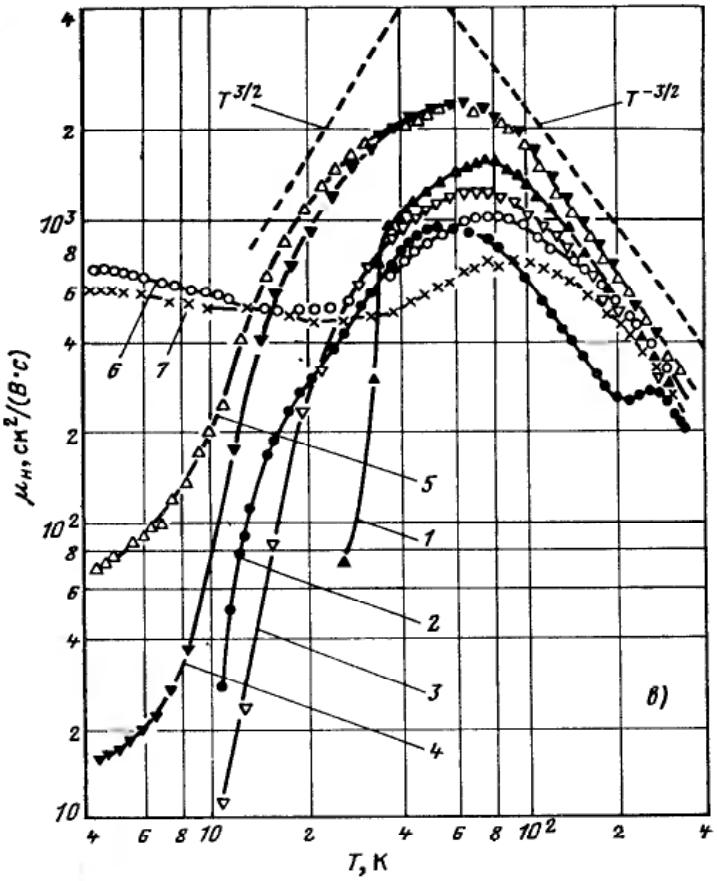


Рис. 22.68. Температурные зависимости удельного сопротивления *(а)* и коэффициента Холла *(б)* в *n*- и *p*-Mg_2Ge [135]:

1—5 — образцы с различной концентрацией носителей, возрастающей от *1* к *5*





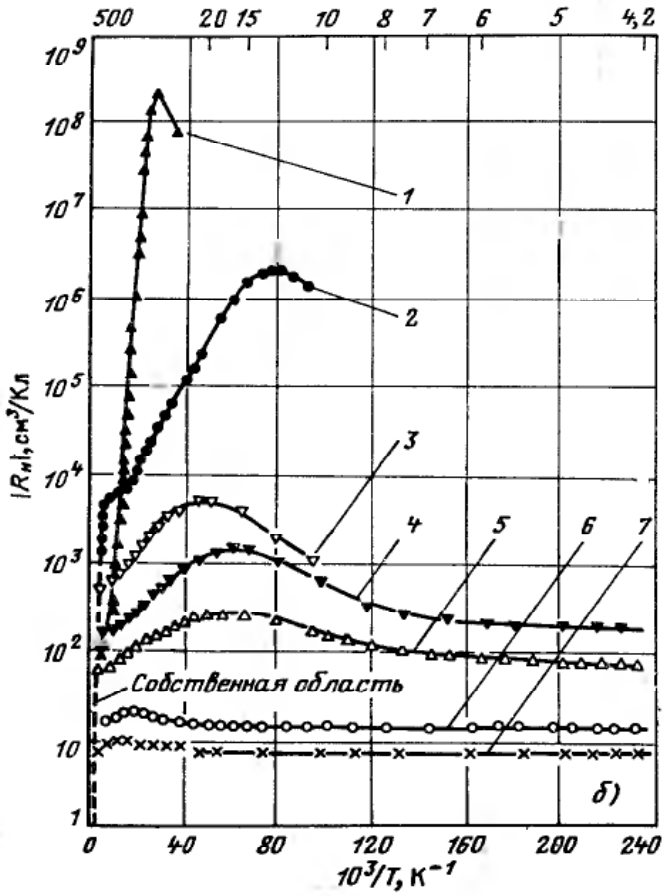


Рис. 22.69. Температурные зависимости удельного сопротивления (*а*), коэффициента Холла (*б*) и холловской подвижности электронов (*в*) в различных образцах n-Mg_2Ge с концентрацией носителей, меняющейся от $1{,}3 \cdot 10^{16}$ до $8{,}2 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ (*1—7*)

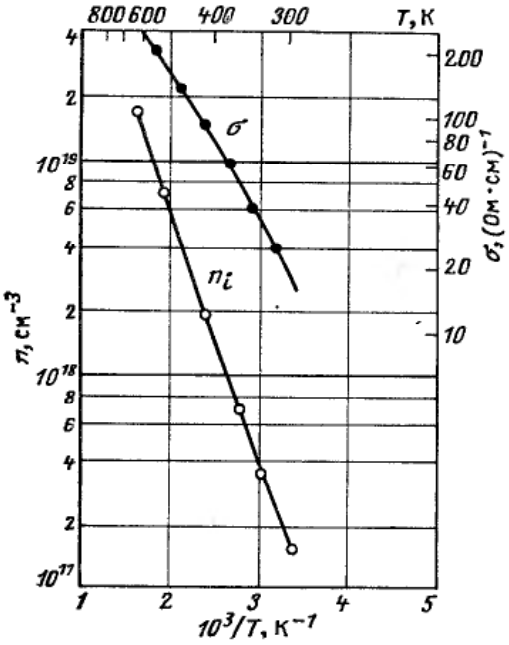


Рис. 22.70. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в Mg_2Sn, определенная из данных по отражению на свободных носителях (○) и электропроводности (●) [147]

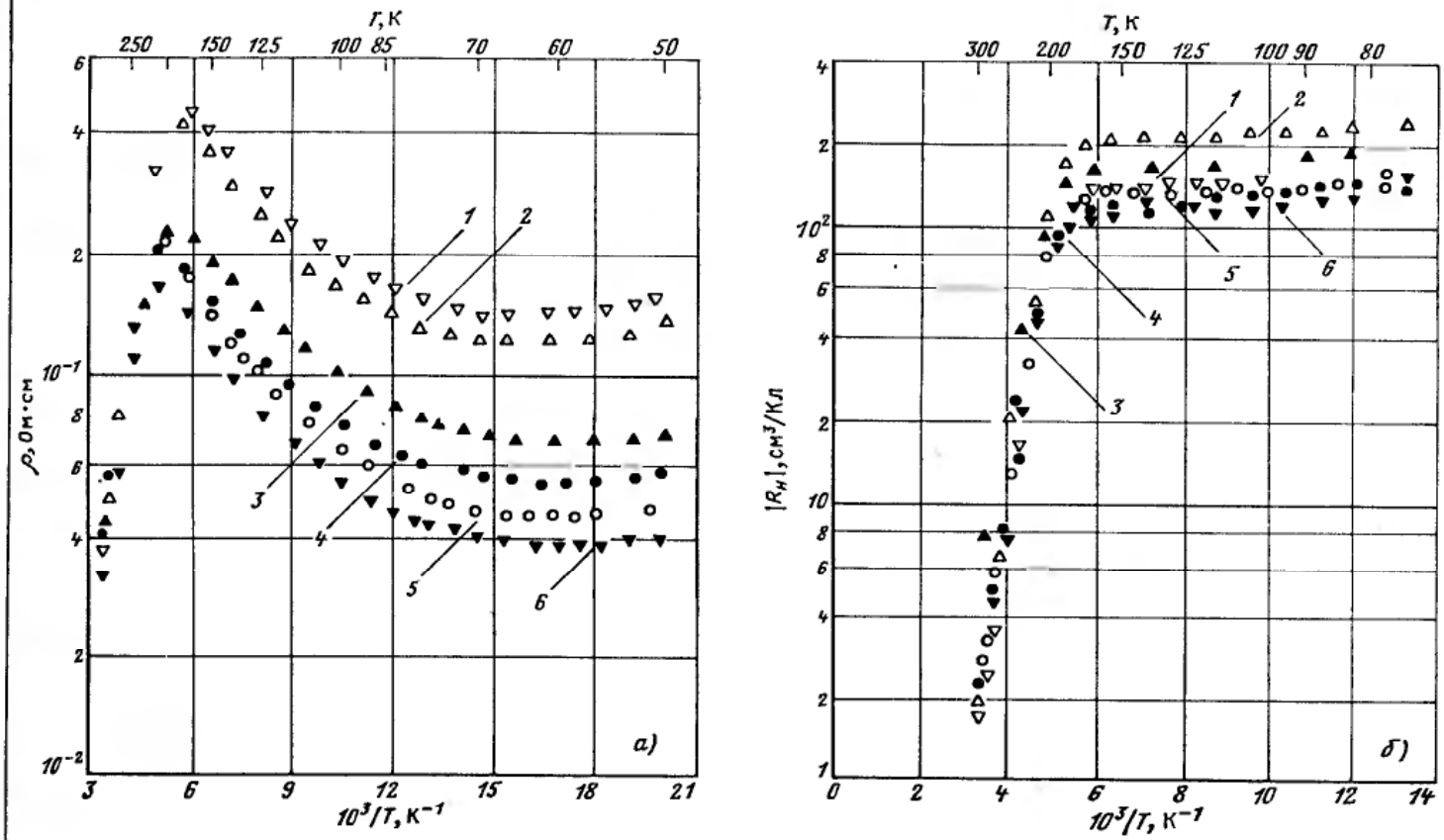
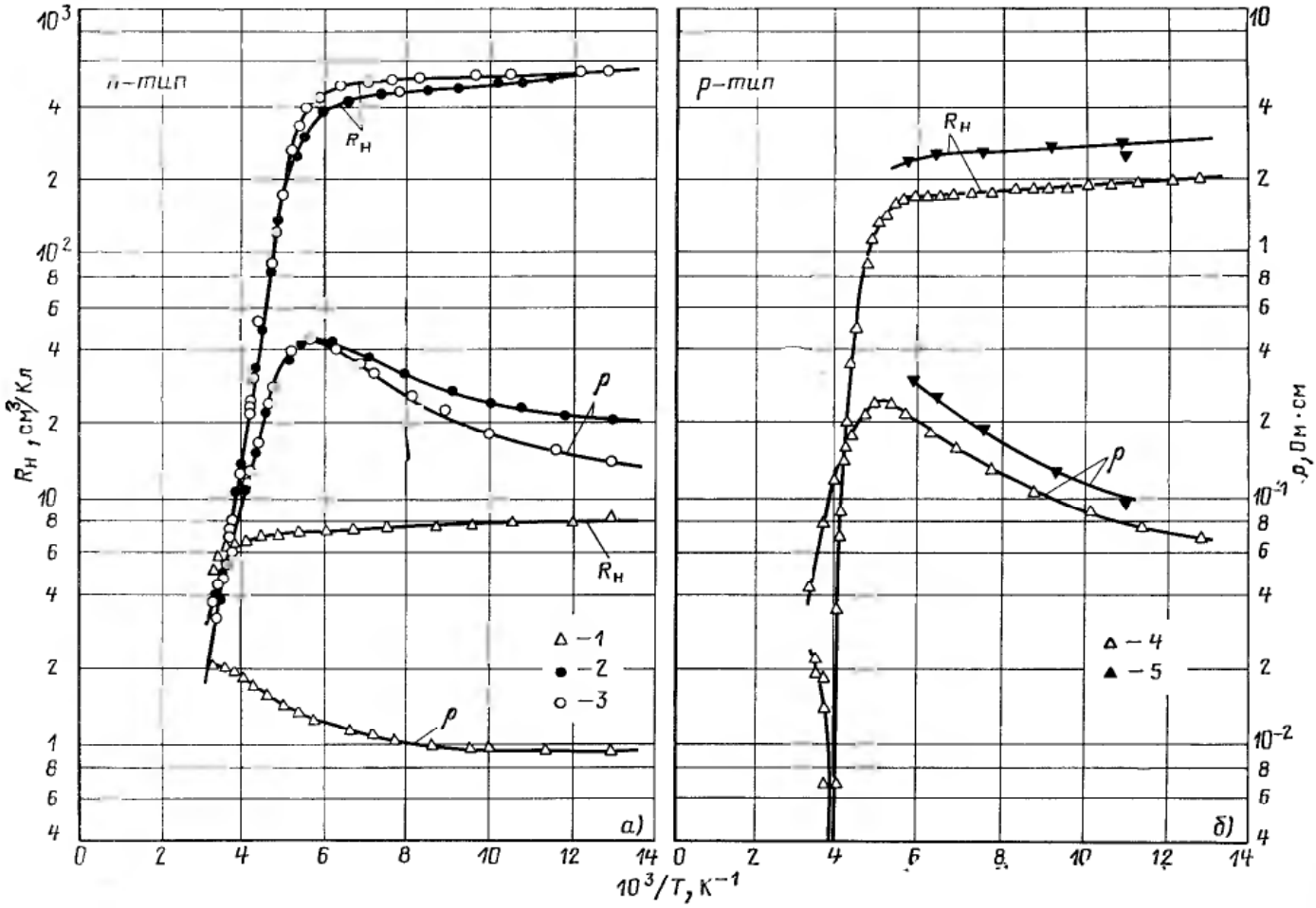


Рис. 22.71. Температурные зависимости удельного сопротивления (*а*) и коэффициента Холла (*б*) для различных образцов *n*-Mg_2Sn с концентрацией носителей, меняющейся от $3 \cdot 10^{16}$ до $6 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$ (*1—6*) в области смешанной проводимости [137]



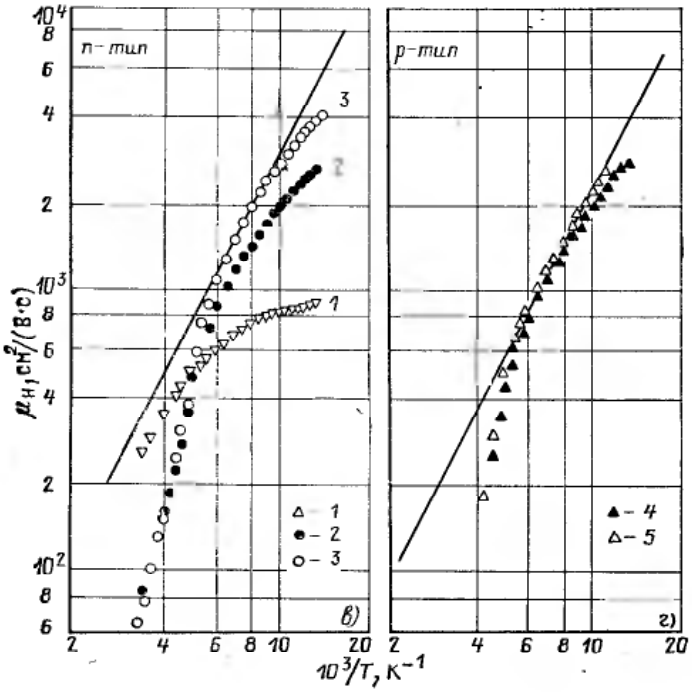


Рис. 22.72. Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла n-Mg_2Sn (*а*), p-Mg_2Sn (*б*), а также холловской подвижности электронов (*в*) и дырок (*г*) в различных образцах n- и p-типа [146]:
концентрация носителей, $см^{-3}$: *1*—$9 \cdot 10^{17}$ (*n*); *2* — $1{,}5 \cdot 10^{16}$ (*n*); *3*—$1{,}3 \cdot 10^{16}$ (*n*); *4*—$4{,}3 \cdot 10^{16}$ (*p*); *5*—$3 \cdot 10^{16}$ (*p*)

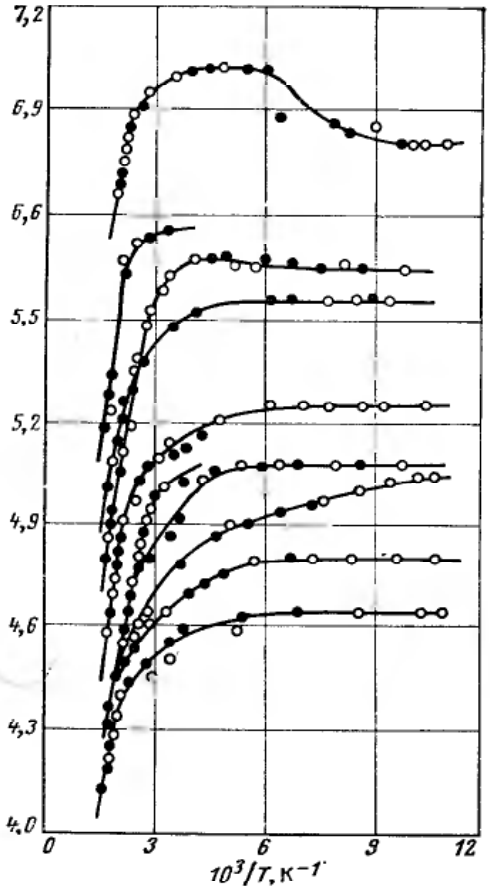


Рис. 22.73. Температурная зависимость удельного сопротивления Mg_2Pb для образцов p-типа [158]

$\ln(10^6\,\rho)$, Ом·см

● — измерения при возрастании температуры образца;
○ — измерения при уменьшении температуры образца

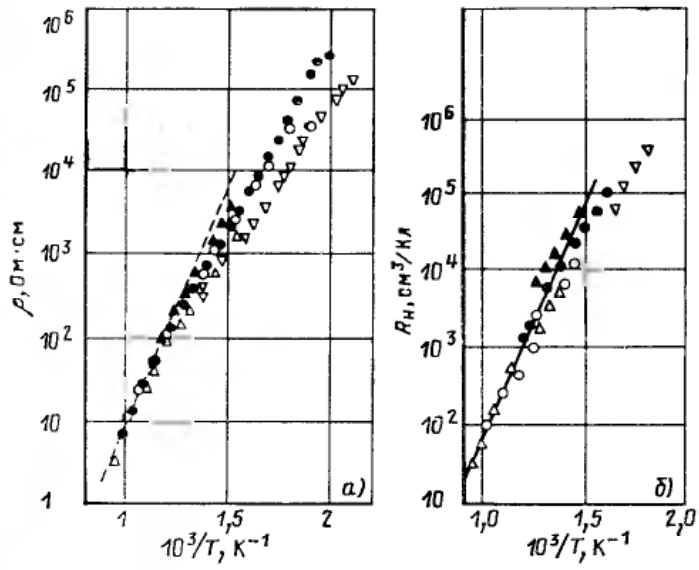


Рис. 22.74. Температурная зависимость сопротивления (*а*) и коэффициента Холла (*б*) различных поликристаллических образцов Mg_3As_2 [160]

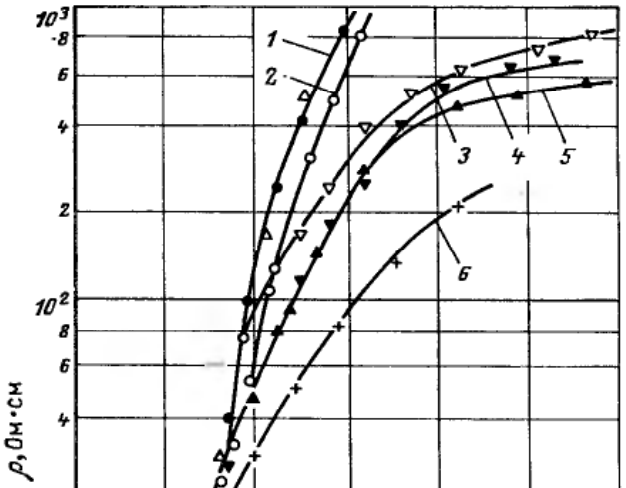


Рис. 22.75. Температурная зависимость сопротивления Zn_3P_2 в собственной области [163]:
концентрация носителей возрастает от *1* к *6*

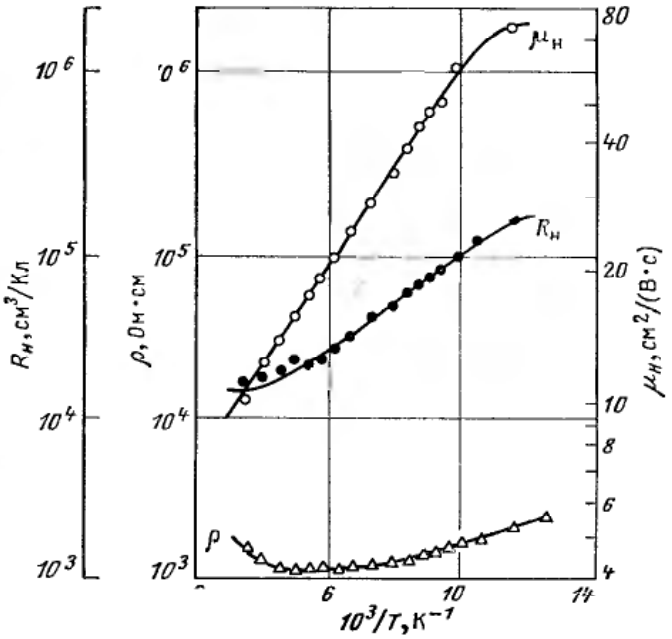


Рис. 22.76. Температурная зависимость удельного сопротивления ρ, коэффициента Холла $R_н$ и подвижности дырок $\mu_н$ в Zn_3P_2 [165]

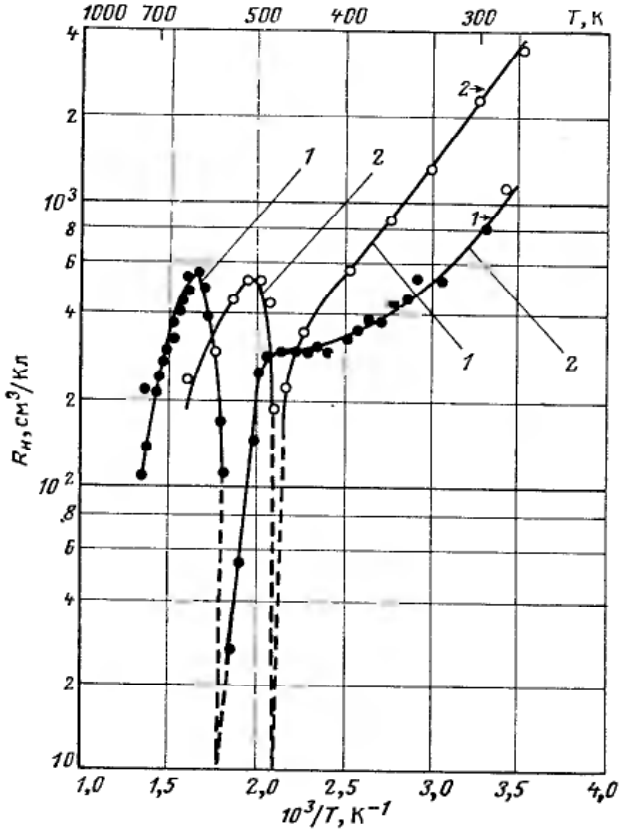


Рис. 22.77. Температурная зависимость коэффициента Холла в β-ZnP_2 [166]:
1 — кристаллы, полученные из паровой фазы; *2* — кристаллы, полученные из жидкой фазы

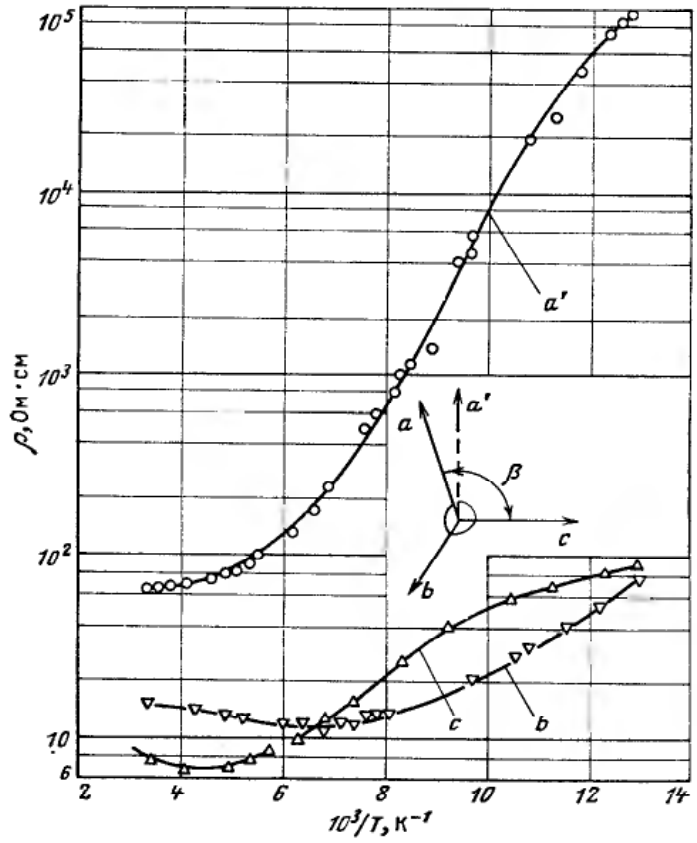


Рис. 22.78. Температурная зависимость удельного сопротивления для трех вырезанных из одного монокристалла образцов $ZnAs_2$ [167]:
ориентация образцов показана на вставке, направления *b* и *c* соответствуют кристаллическим осям, направление *a'* перпендикулярно *b* и *c* и составляет угол 12° с моноклинной осью *a*

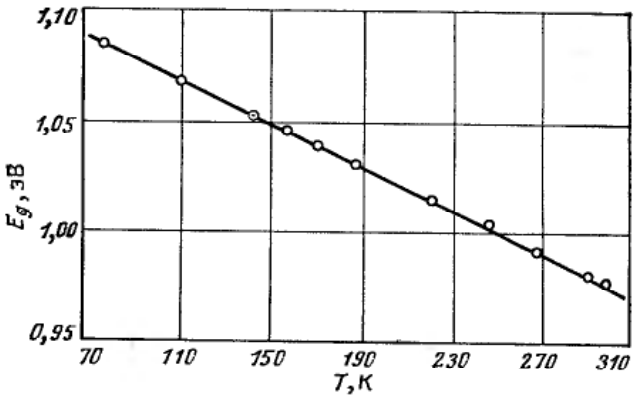


Рис. 22.79. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны в Zn_3As_2 [176]

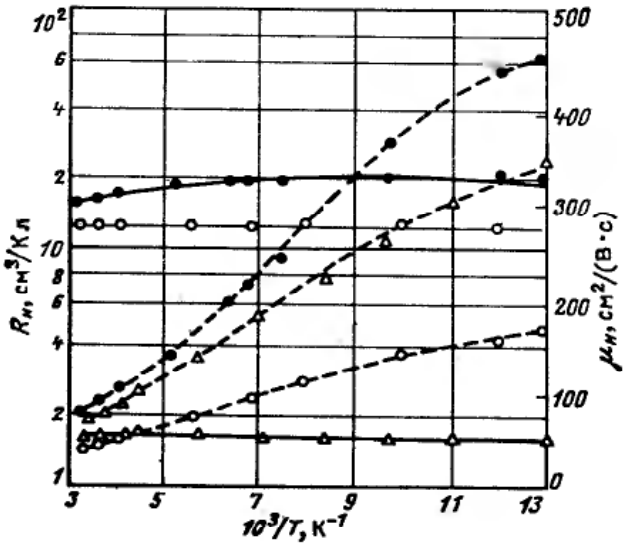


Рис. 22.80. Температурные зависимости коэффициента Холла и подвижности дырок в Zn_3As_2 [177]:
——— — $R_н$; - - - - — μ_p; ○ — нелегированный образец; △ — легирован Cu; ● — легирован Te

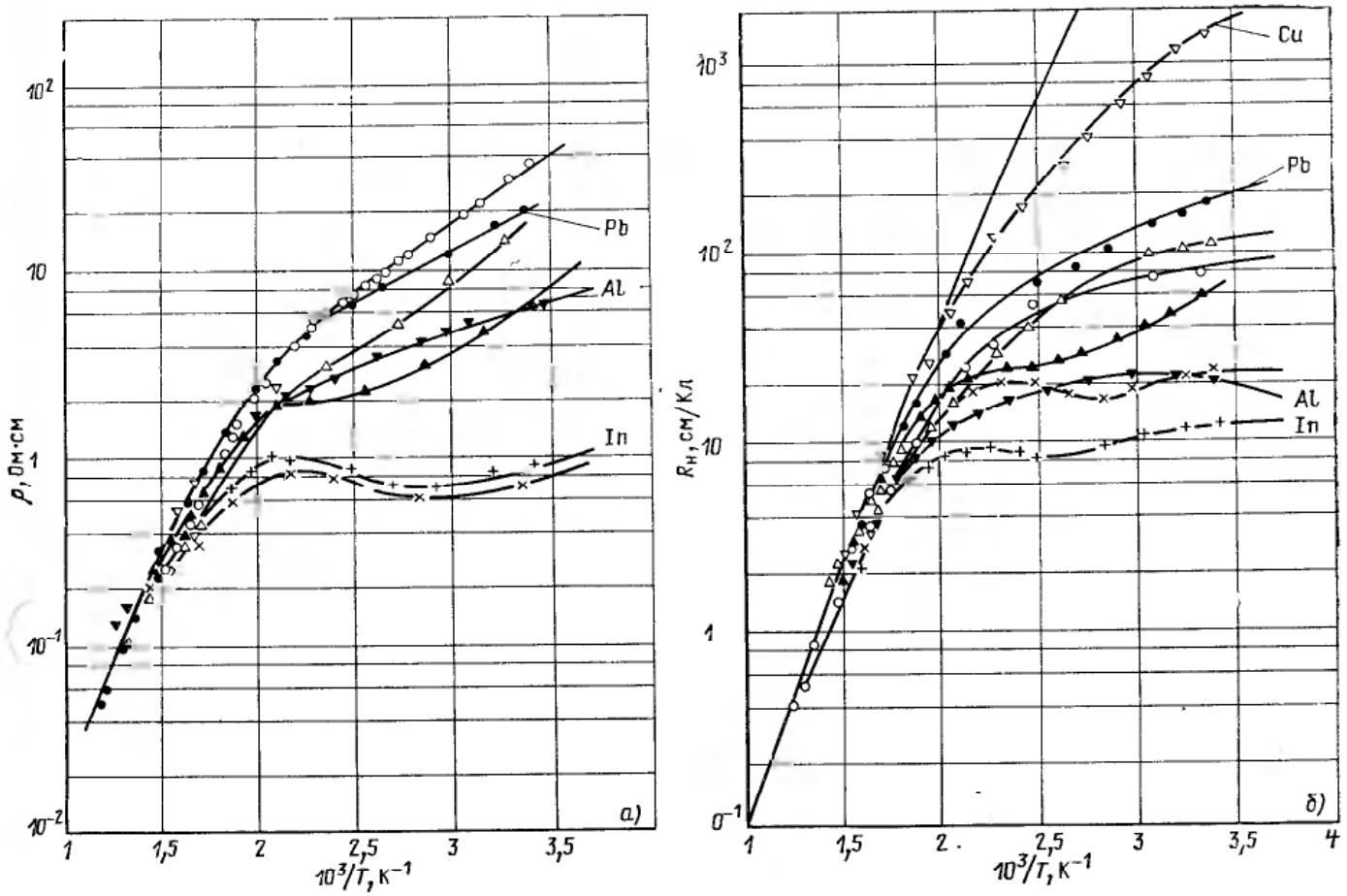


Рис. 22.81. Температурные зависимости удельного сопротивления (*а*) и коэффициента Холла (*б*) в Zn_3As_2 [179]: на ряде кривых указаны легирующие элементы, остальные кривые отиосятся к чистому материалу; кривая без экспериментальных точек — коэффициент Холла в собственном материале [179]

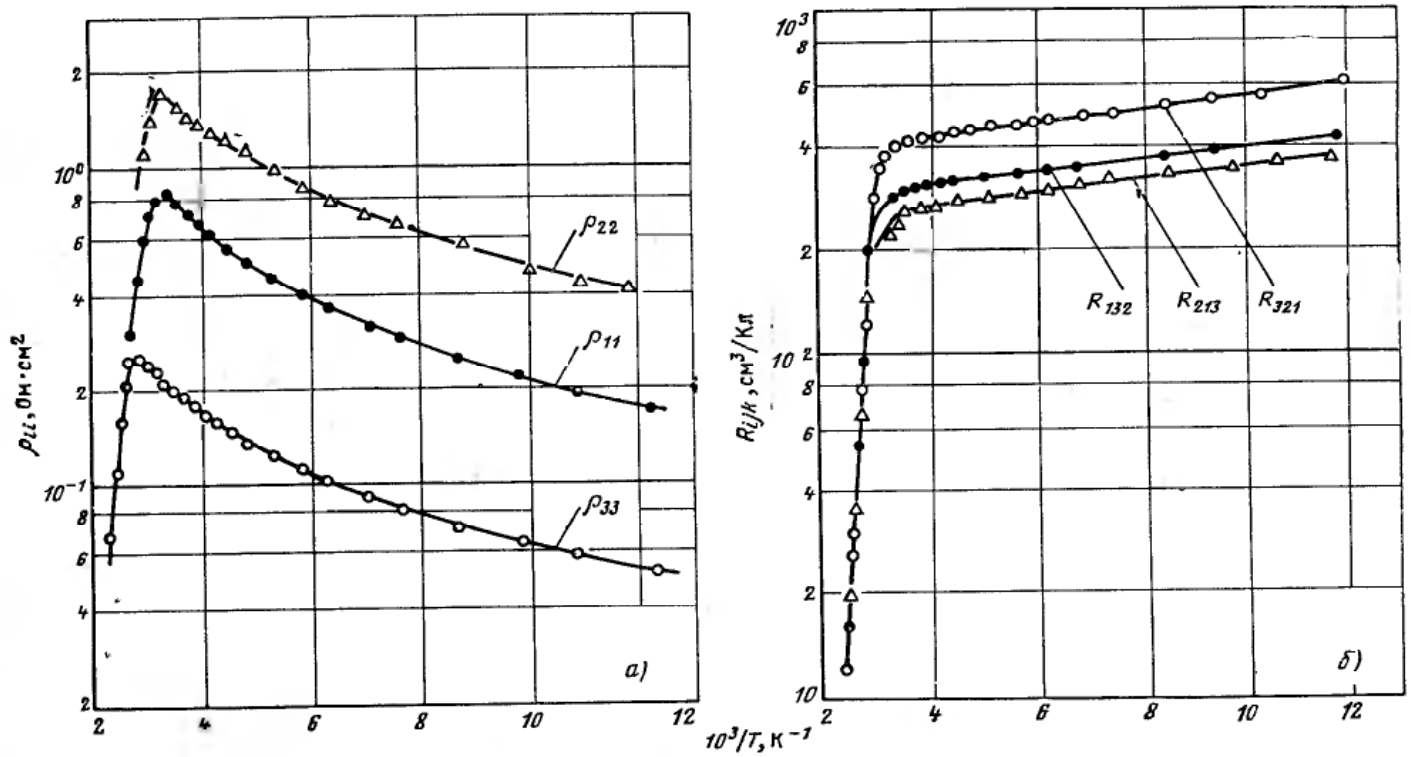


Рис. 22.82. Температурные зависимости компонент тензора удельного сопротивления (*а*) и коэффициента Холла (*б*) в ZnSb [180]

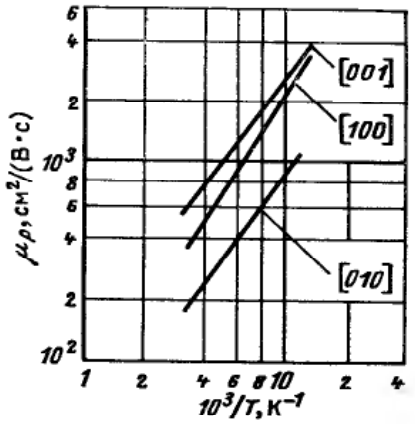


Рис. 22.83. Температурная зависимость холловской подвижности дырок для трех главных направлений в ZnSb [182]

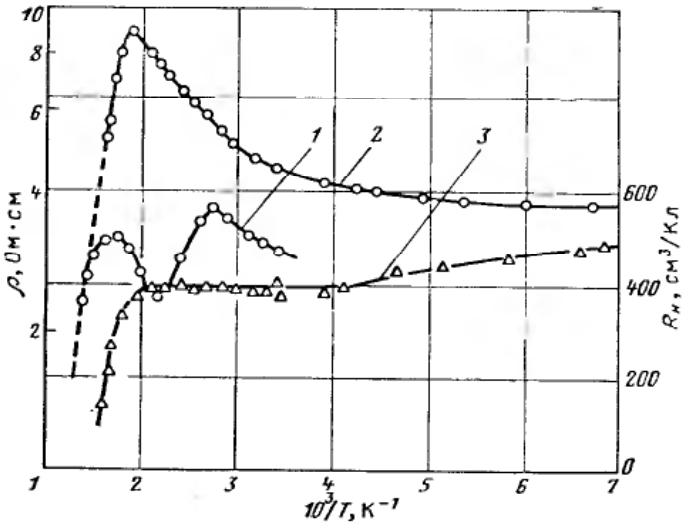


Рис. 22.85. Температурные зависимости удельного сопротивления (*1*, *2*) и коэффициента Холла (*3*) в CdP_4 [189]:
1 — монокристалл; *2*, *3* — поликристаллы

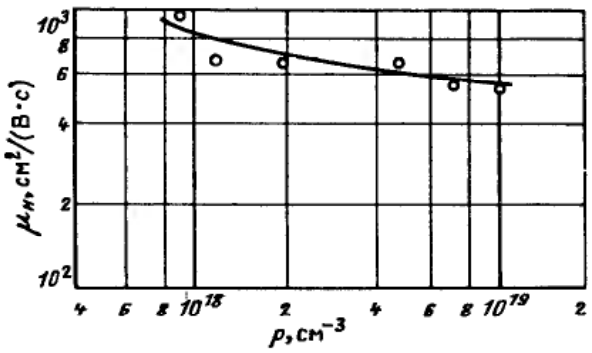


Рис. 22.84. Зависимость холловской подвижности дырок от их концентрации при $T=300$ К в Zn_4Sb_3 [187]

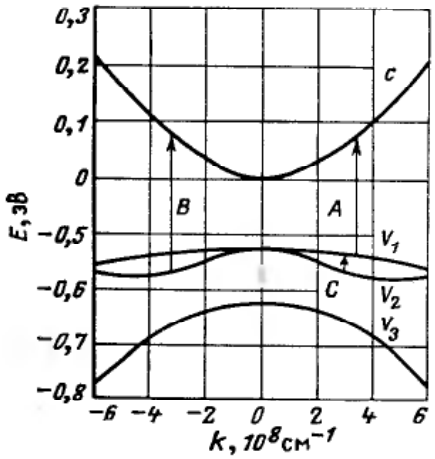


Рис. 22.86. Структура энергетических зон в Cd_3P_2 [192] ($E_g=0{,}53$ эВ, $\Delta_{so}=0{,}1$ эВ, $P=6{,}7\cdot10^{-8}$ эВ·см, $m_{v1}=0{,}5\,m_0$) [192]:
A, *B*, *C* — разрешенные прямые межзонные переходы; V_1, V_2, V_3 — валентные зоны; *c* — зона проводимости

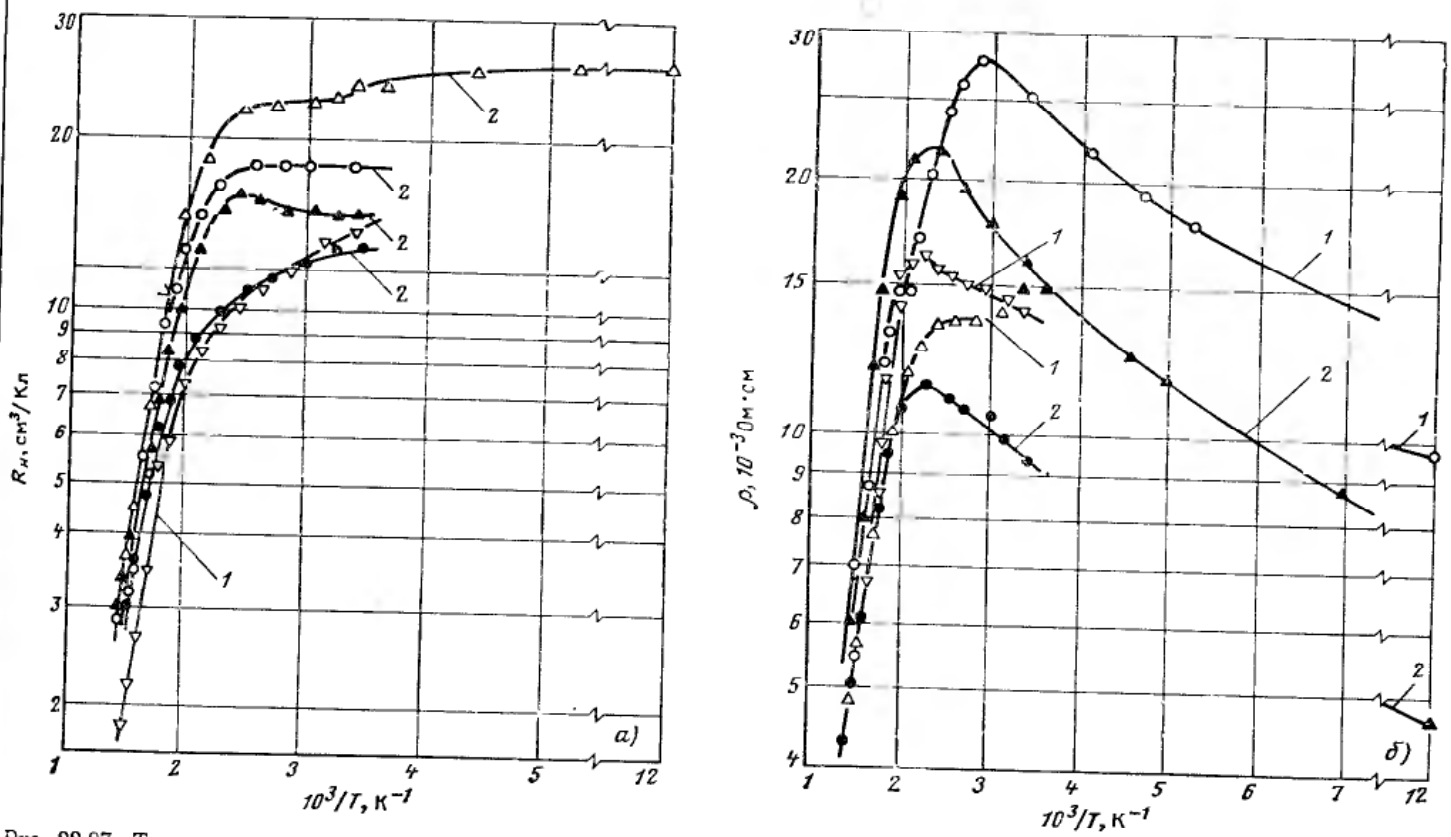


Рис. 22.87. Температурные зависимости коэффициента Холла (*а*) и удельного сопротивления (*б*) в монокристаллических (*1*) и поликристаллических (*2*) образцах Cd_3P_2 [190]

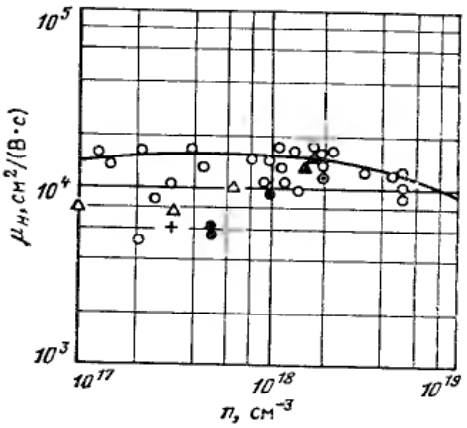


Рис. 22.88. Зависимость подвижности электронов при $T=77$ К от их концентрации в Cd_3P_2 [191]:
сплошная линия — расчет; точки — разные экспериментальные работы

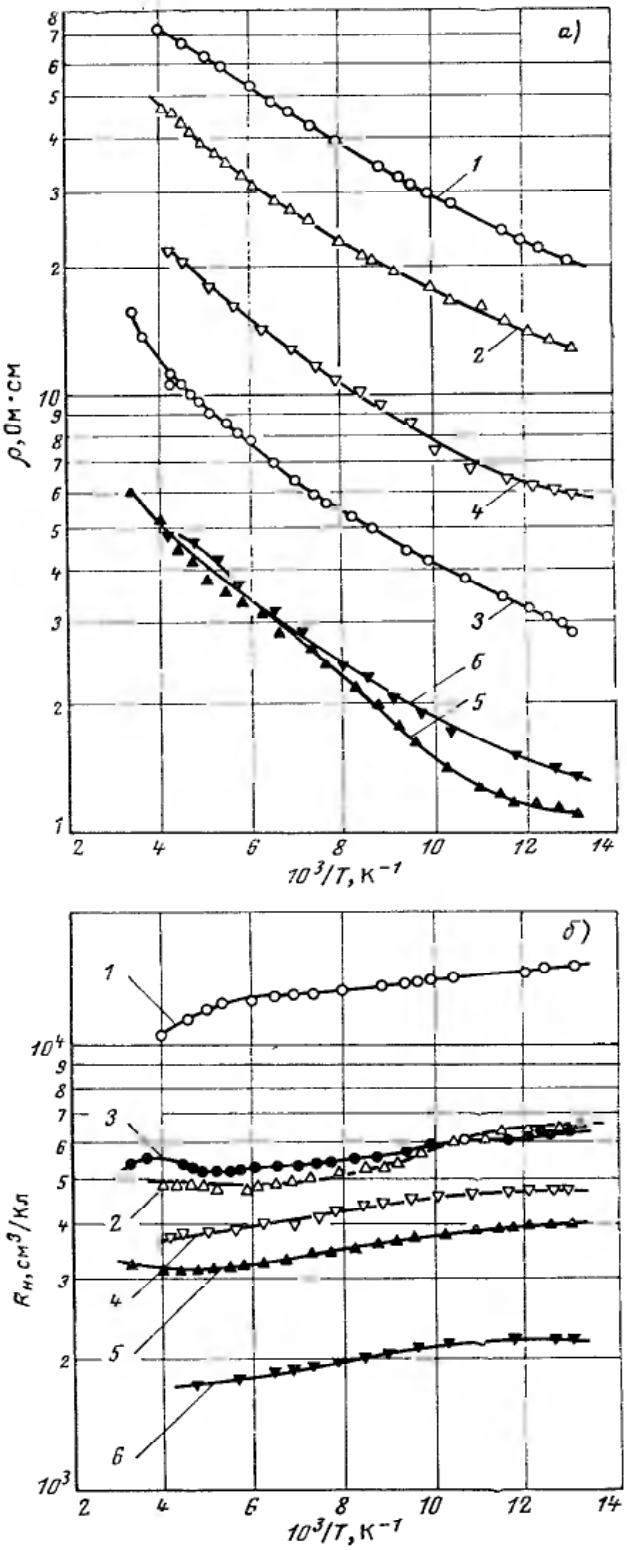


Рис. 22.89. Температурные зависимости удельного сопротивления (*а*) и коэффициента Холла (*б*) для монокристаллических образцов n-$CdAs_2$ [195]:
концентрация носителей возрастает от *1* к *6*

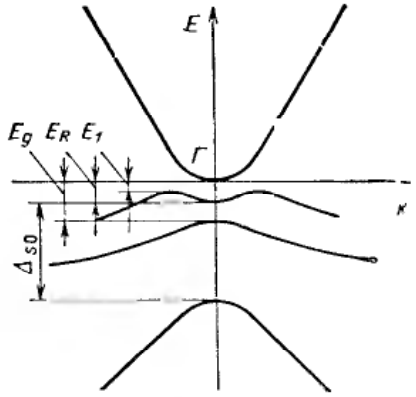


Рис. 22.90. Структура энергетических зон в Cd_3As_2 [293]:
$Eg = 0{,}12 + 3{,}3 \cdot 10^{-4}\ T$ эВ; $E_R = 0{,}03$ эВ (10 К); $E_R = 0{,}05$ эВ (4,2 К); $E_1 = 0{,}026$ эВ (10 К); $\Delta s_0 = 0{,}21 \div 0.31$ эВ

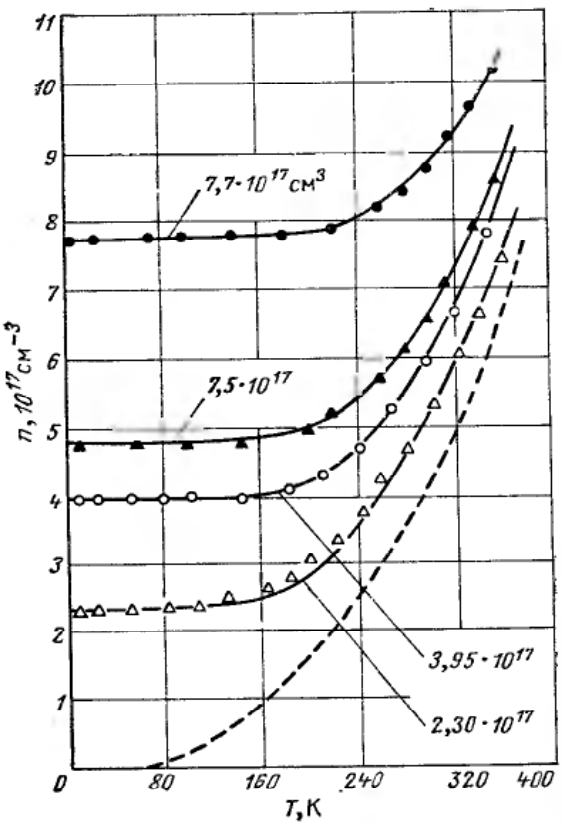


Рис. 22.91. Температурная зависимость концентрации электронов в различных кристаллах Cd_3As_2 [196]:
пунктирная линия соответствует собственной концентрации

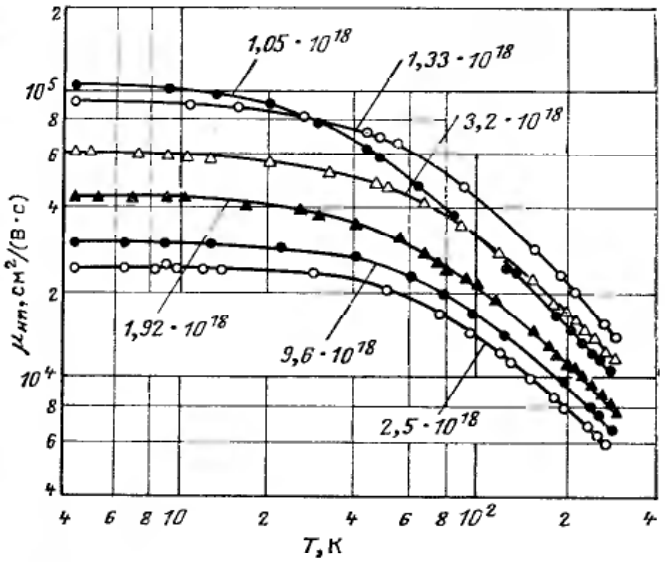


Рис. 22.92. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в Cd_3As_2 [187]

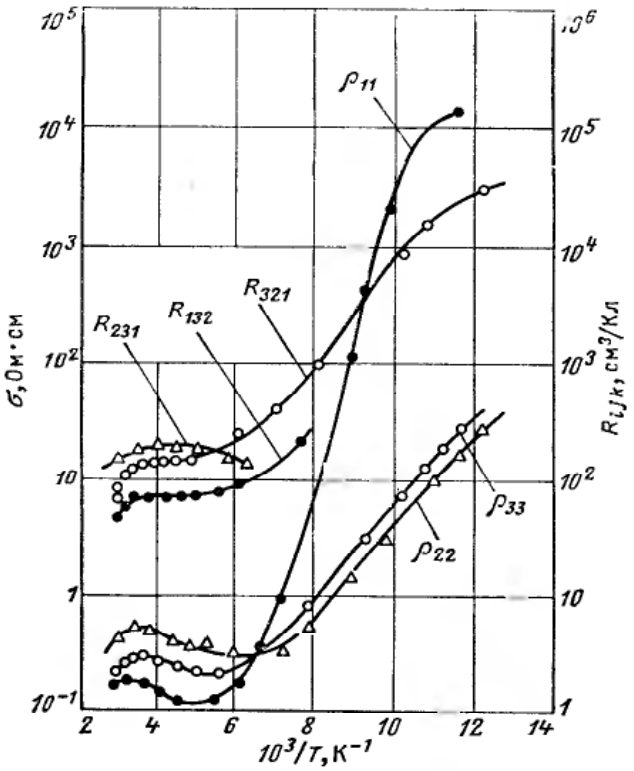


Рис. 22.94. Температурные зависимости компонент тензора удельного сопротивления и коэффициента Холла в n-CdSb, легированном Ga [205]

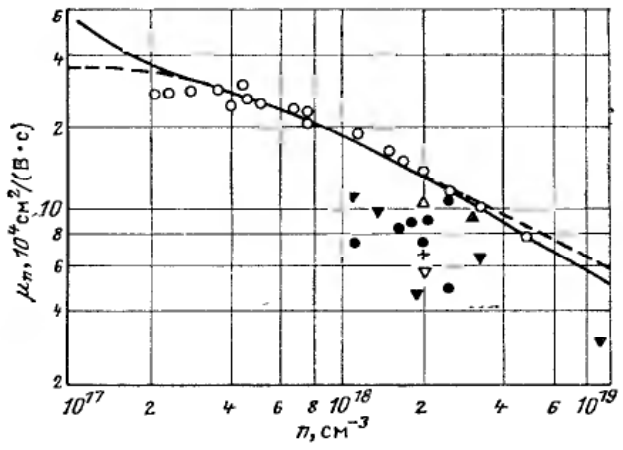


Рис. 22.93. Зависимость подвижности электронов от их концентрации в Cd_3As_2 при $T=4{,}2$ К по данным различных авторов [204]:
линии — расчет

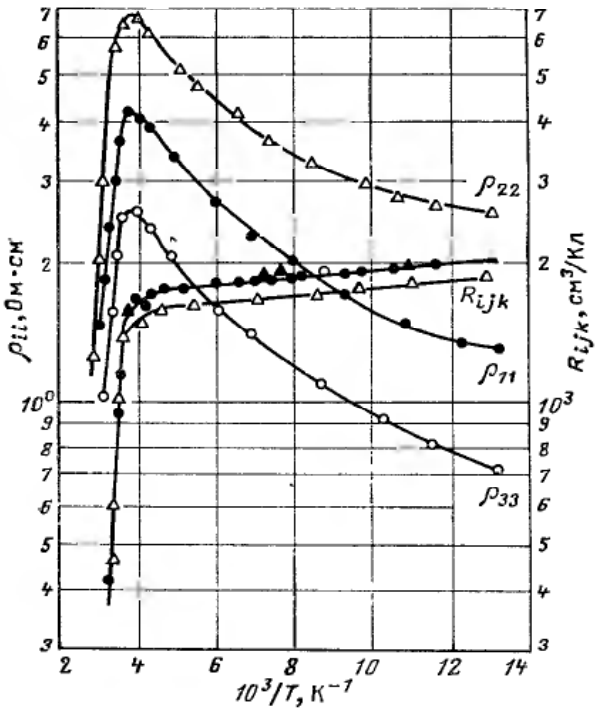


Рис. 22.95. Температурная зависимость компонент тензора удельного сопротивления и коэффициента Холла в p-CdSb [205]

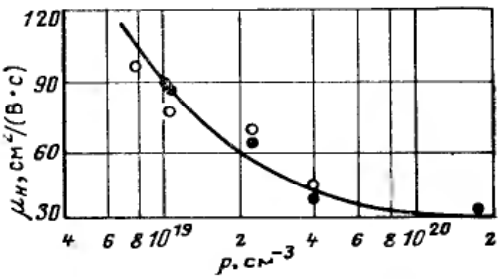


Рис. 22.96. Зависимость холловской подвижности дырок от их концентрации в Cd_4Sb_3 [187]

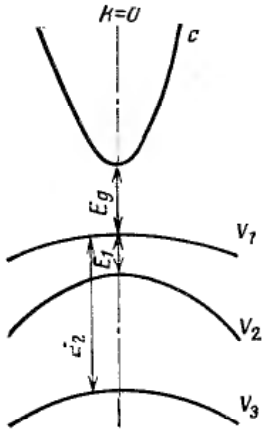


Рис. 22.98. Зонная структура полупроводников типа $A^{II}B^{VI}$ (вюрцит) [138]

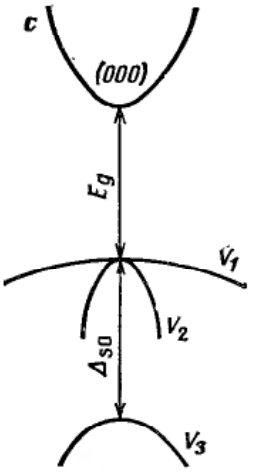


Рис. 22.97. Зонная структура полупроводников типа $A^{II}B^{VI}$ (сфалерит) [138]

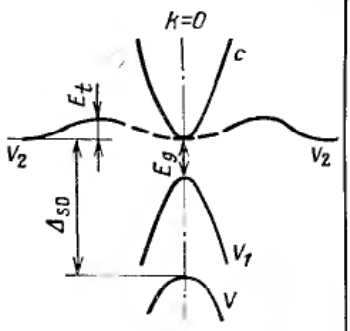
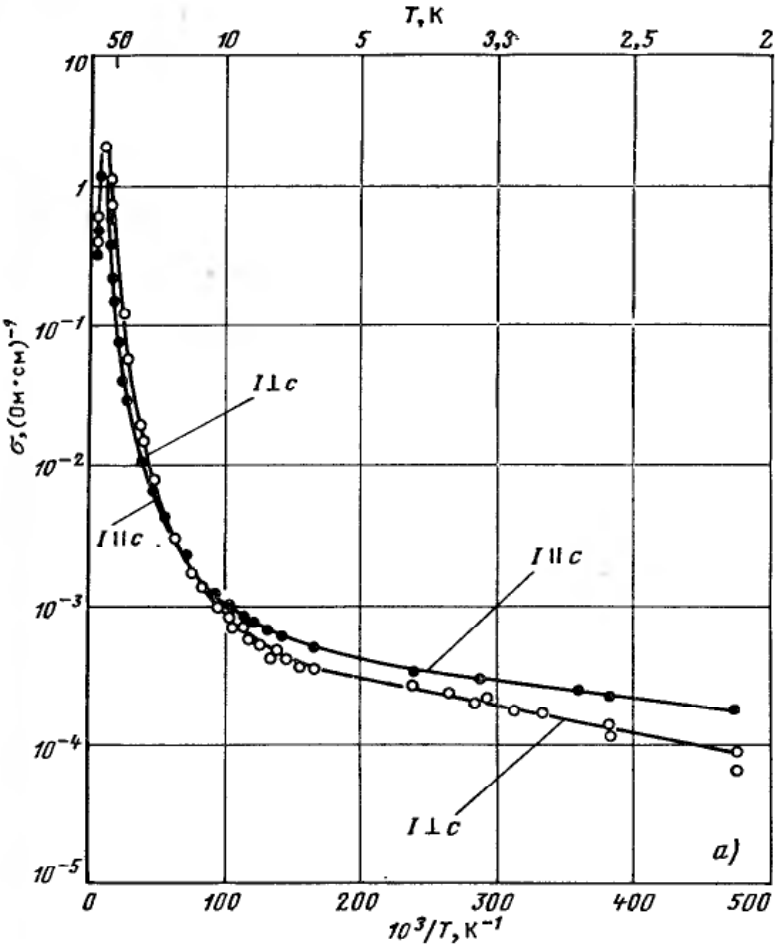
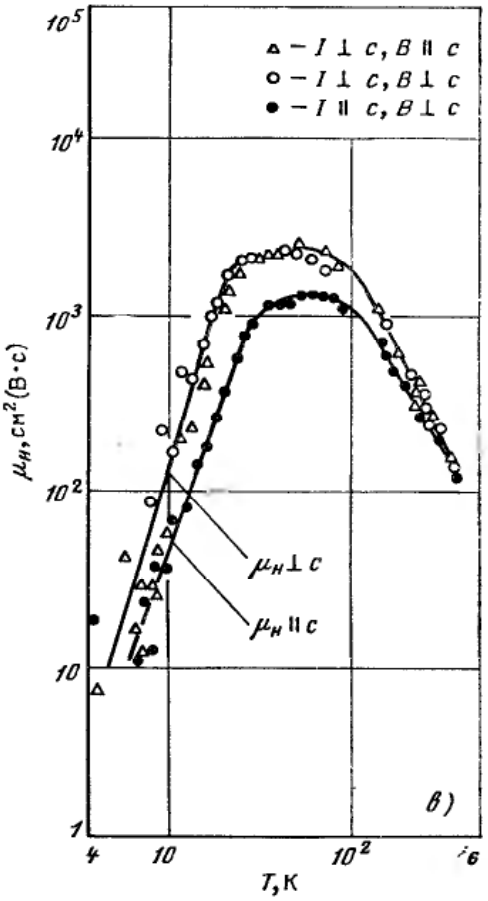


Рис. 22.99. Зонная структура β-HgS, HgSe и HgTe [138, 199, 200]





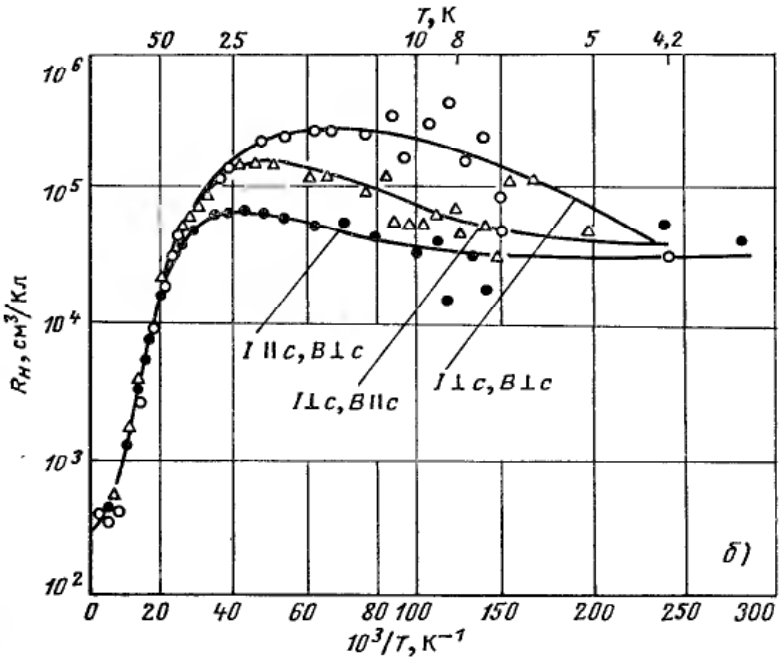


Рис. 22.100. Температурные зависимости проводимости (*а*), коэффициента Холла (*б*) и холловской подвижности электронов (*в*) в ZnO при различных ориентациях тока I и магнитного поля B относительно оси c [207]

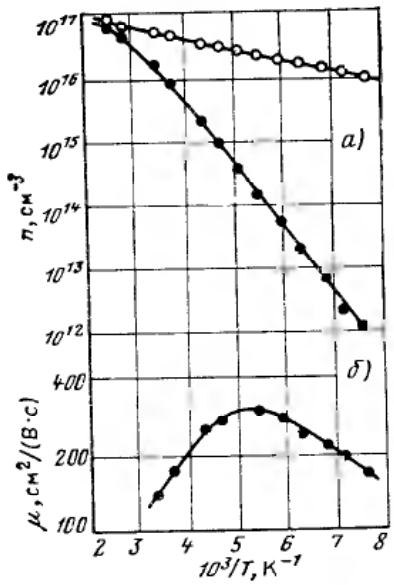


Рис. 22.101. Температурные зависимости концентрации электронов (*а*) и их холловской подвижности (*б*) в ZnS [138]:
● — гексагональный ZnS, легированный Al и отожженный при 1050 К; ○ — кубический ZnS, легированный I и отожженный при 950 К

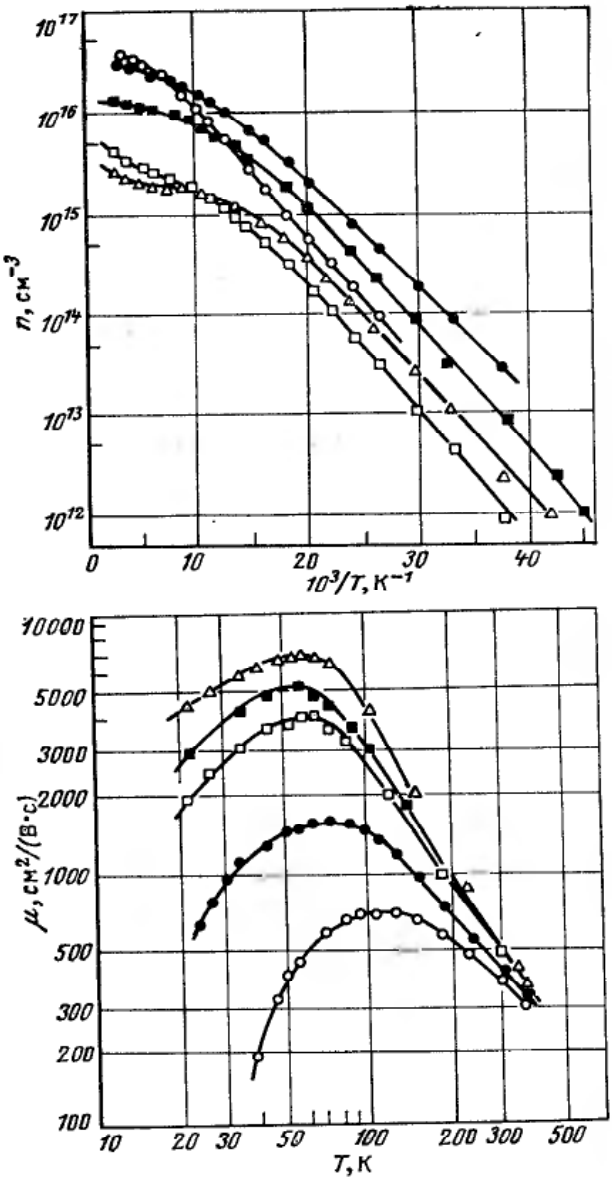


Рис. 22.102. Температурные зависимости концентрации электронов (*а*) и их холловской подвижности (*б*) в кристаллах *n*-ZnSe с различной концентрацией доноров и акцепторов [138]:
N_D, N_A, 10^{16} см$^{-3}$: △ —0,34 (N_D), 0,13 (N_A); ■ —1,8 (N_D), 0,5 (N_A); □ —1,95 (N_D), 0,75 (N_A); ● —3,7 (N_D), 0,5 (N_A); ○ —7,4 (N_D), 3,4 (N_A)

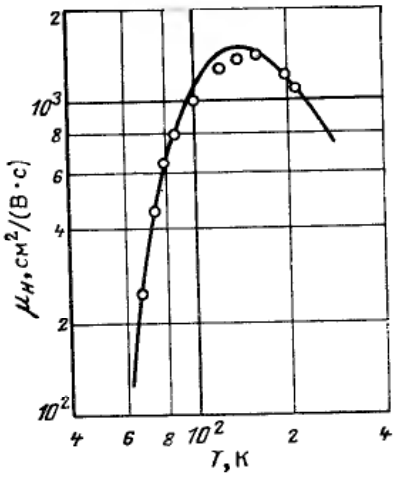


Рис. 22.103. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в ZnSe [208]

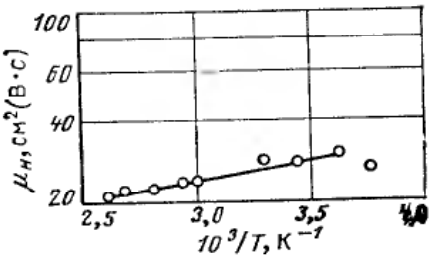
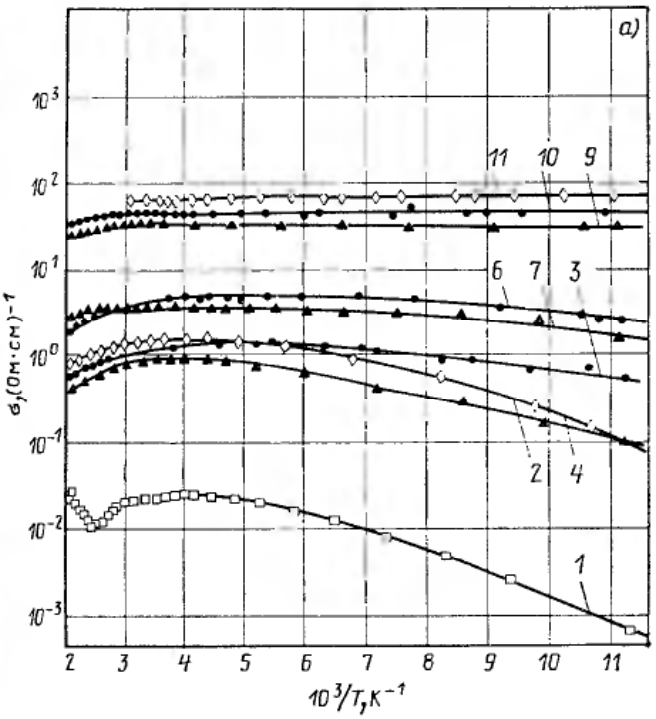
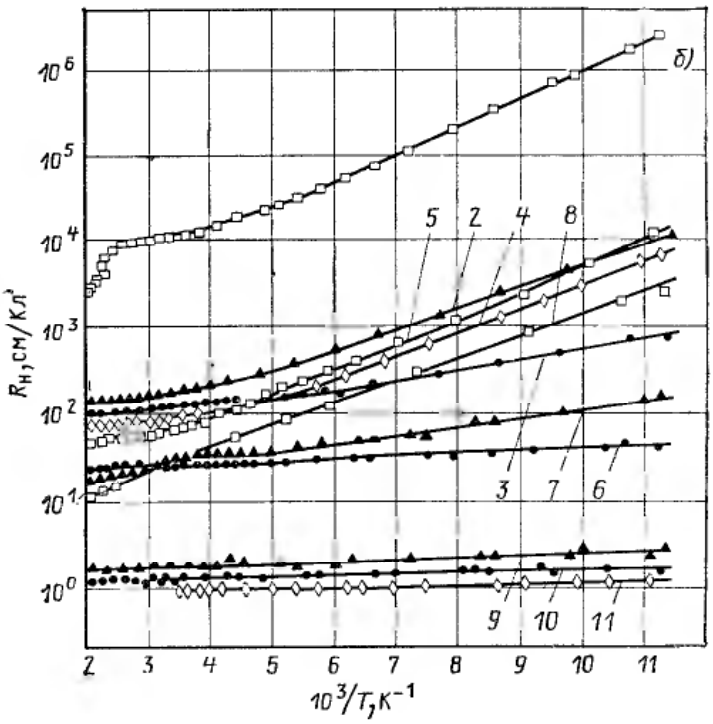


Рис. 22.104. Температурная зависимость холловской подвижности в ZnSe [210]





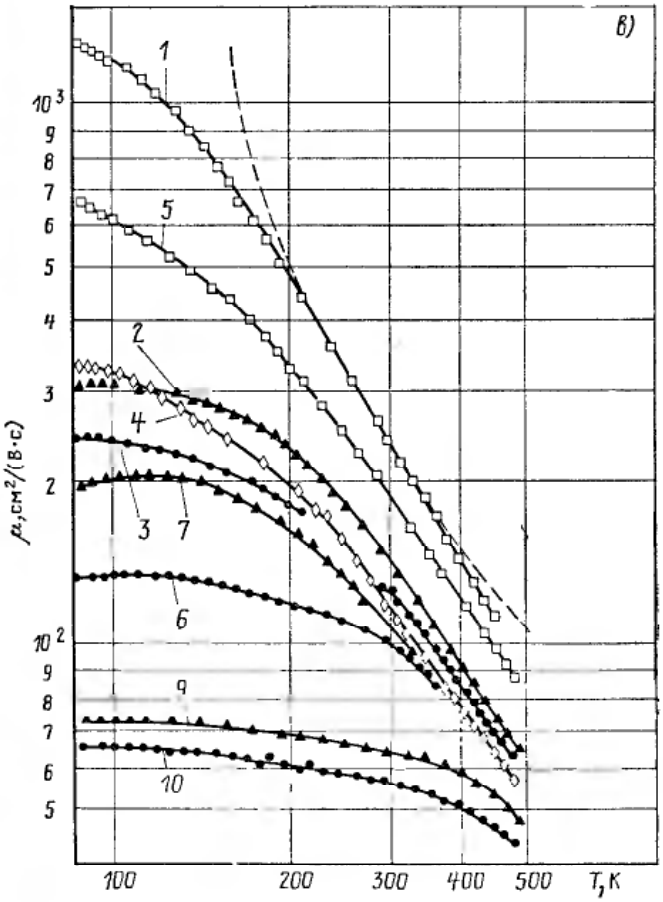


Рис. 22.105. Температурные зависимости проводимости (*а*), коэффициента Холла (*б*) и подвижности дырок (*в*) в кристаллах *p*-ZnTe [235]:

пунктир — теоретическая зависимость; легирующая примесь: ◇ —Cs; □ —Te; △ —P; ● — Li; концентрация носителей при $T=300$ К, см$^{-3}$: *1*—$5\cdot10^{4}$; *2*—$3{,}2\cdot10^{16}$; *3*—$5{,}1\cdot10^{16}$; *4*—$6{,}9\times10^{16}$; *5*—$7{,}9\cdot10^{16}$; *6*—$2{,}8\cdot10^{17}$; *7*—$2{,}1\cdot10^{17}$; *8*—$2\cdot10^{17}$; *9*—$3\cdot10^{18}$; *10*—$4{,}5\cdot10^{18}$; *11*—$6{,}3\cdot10^{18}$

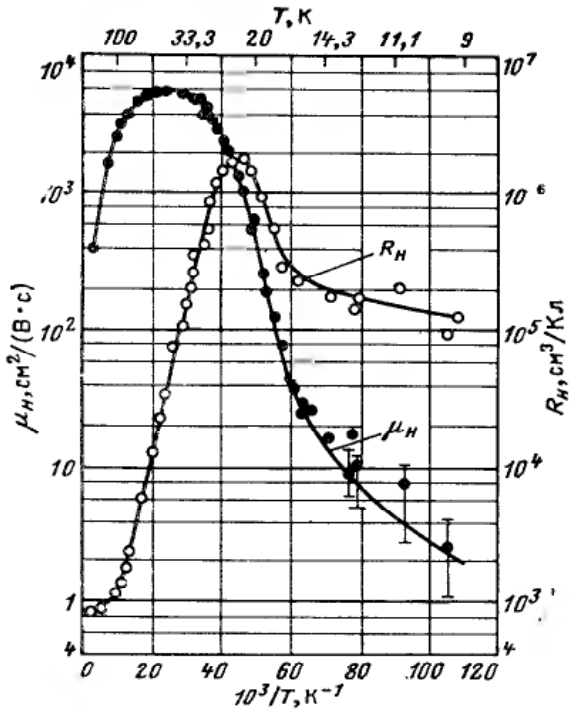


Рис. 22.106. Температурные зависимости коэффициента Холла (○) и холловской подвижности электронов (●) в нелегированном кристалле CdS [213]

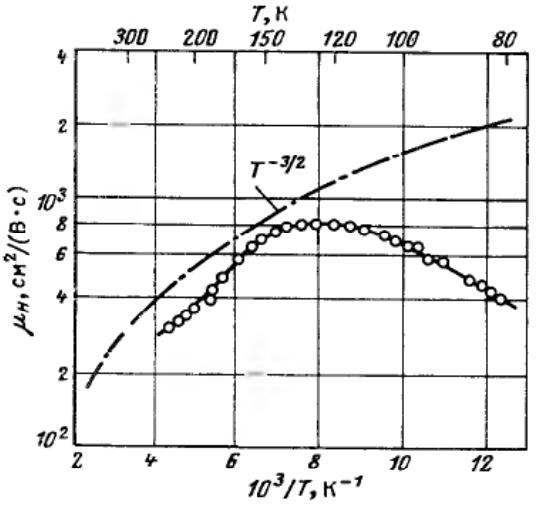


Рис. 22.107. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в различных кристаллах CdS [215]

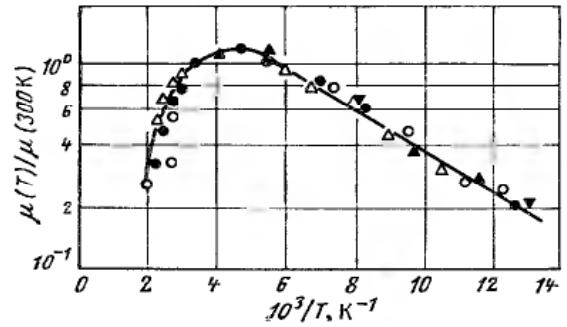


Рис. 22.108. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в разных образцах CdS [217]

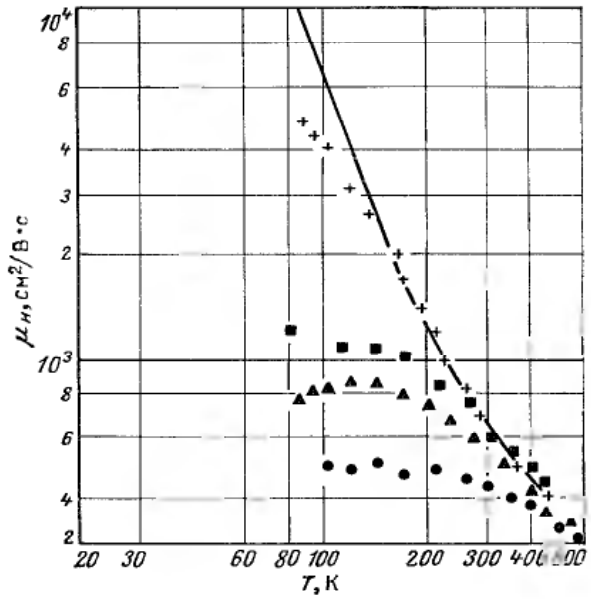


Рис. 22.109. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в CdSe [138]:
концентрация доноров Ga, см⁻³: + —1·10¹⁶ (нелегированный образец); ■ —1,4·10¹⁷; ● —2,9·10¹⁸; кривая — расчет

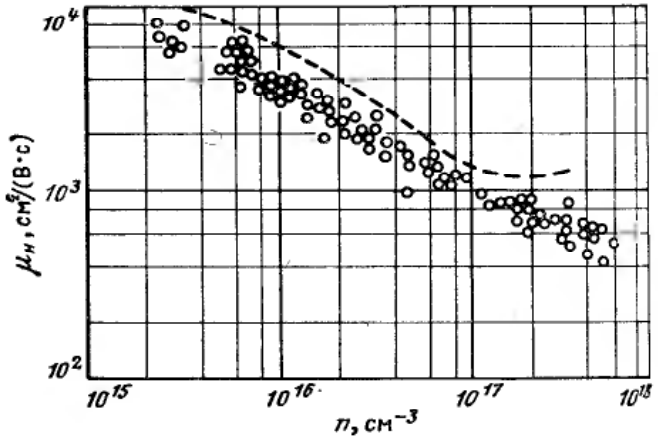
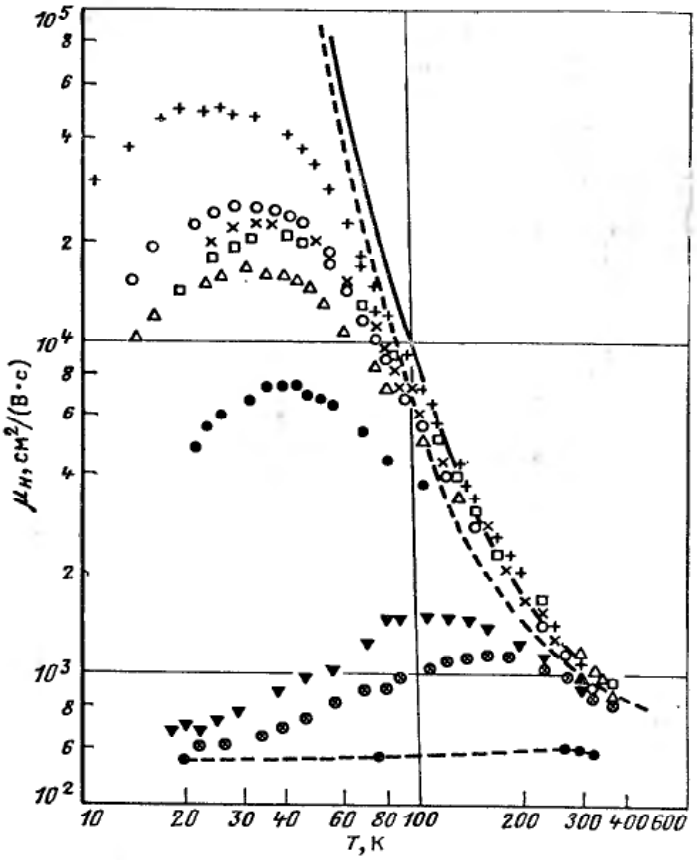


Рис. 22.110. Зависимость холловской подвижности электронов в CdSe при $T=77$ К от их концентрации:
пунктир — расчет [218]

Рис. 22. 112. Температурные зависимости холловской подвижности электронов в n-CdTe [138]. Обозначения см. в подписи к рис. 22.111; сплошная и пунктирная линии — расчет по разным моделям



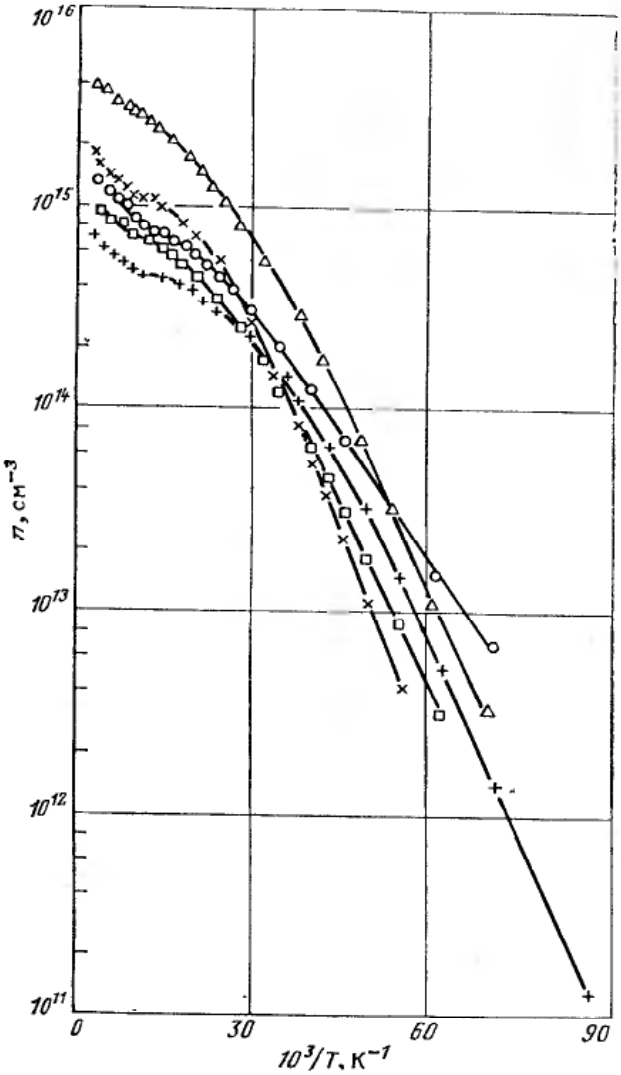


Рис. 22.111. Температурная зависимость концентрации электронов в n-CdTe [138]:

+, ○, ×, □, △ — нелегированные образцы, прошедшие зонную очистку; ○ — отжиг в избытке Cd

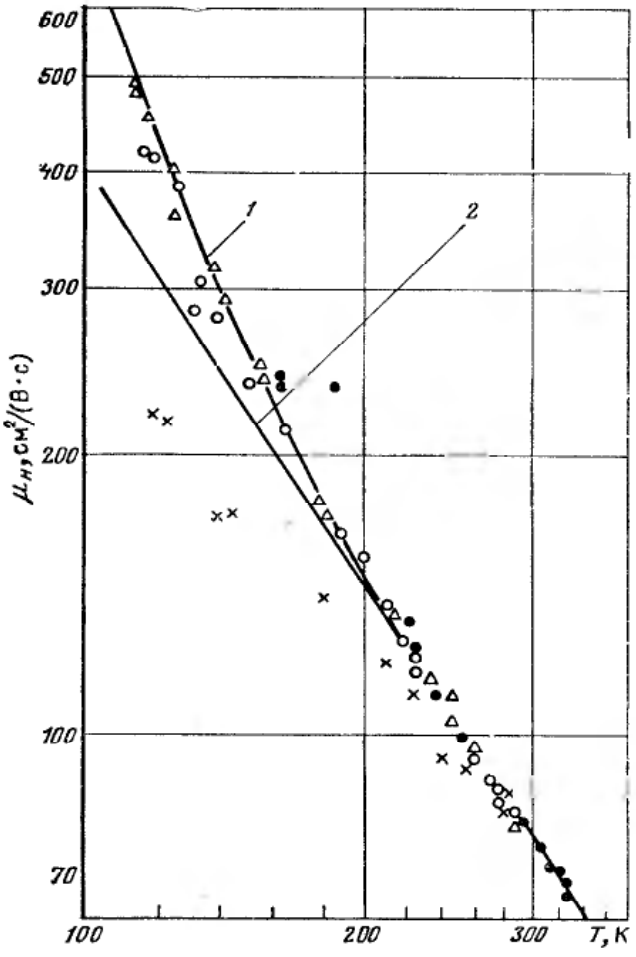


Рис. 22.113. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в p-CdTe [138]:

1, *2* — расчет по формулам: $\mu = 57 \exp[(252/T) - 1]$ и $\mu = 4 \cdot 10^5 \times T^{-3/2}$; удельное сопротивление образцов при $T = 293$ К, Ом·см: ● — $2{,}2 \cdot 10^2$; ○ — $1{,}5 \cdot 10^4$; × — $1{,}9 \cdot 10^2$; △ — $2{,}1 \cdot 10^2$

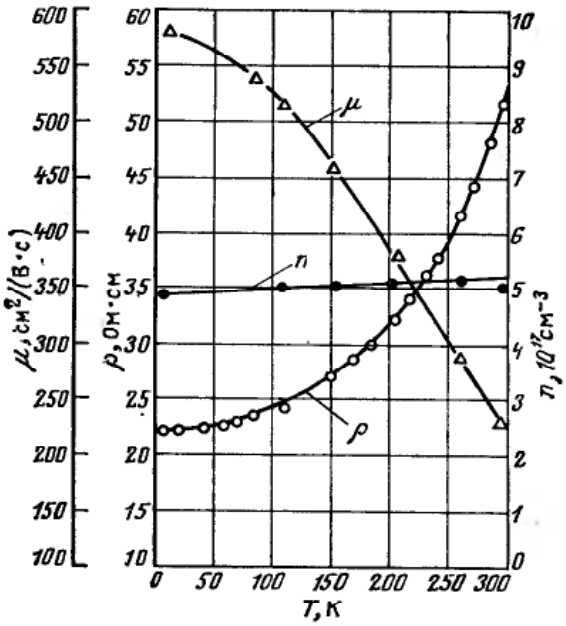


Рис. 22.114. Температурные зависимости удельного сопротивления, подвижности электронов и их концентрации в пленке β-HgS толщиной 11,5 мкм [222]

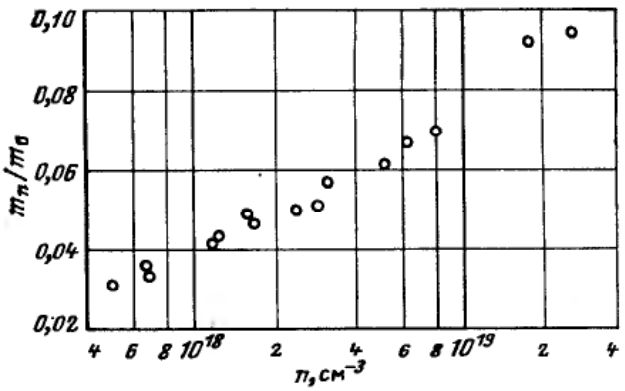


Рис. 22.116. Зависимость эффективной массы электронов в HgSe при $T=300$ К от их концентрации [224]

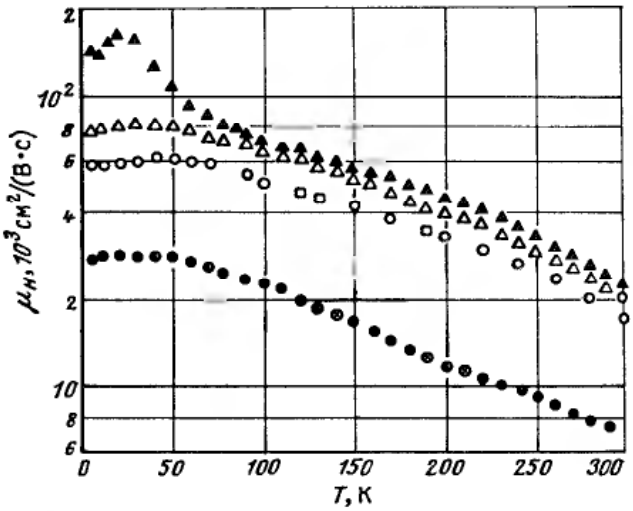


Рис. 22.117. Температурная зависимость подвижности электронов в HgSe [227]. Кристалл подвергался последовательным процессам отжига для получения различных электронных концентраций n, см$^{-3}$, при $T=4{,}2$ К:
▲ — $3{,}60\cdot10^{16}$; △ — $1{,}89\cdot10^{17}$; ○ — $3.78\cdot10^{17}$; ● — $3{,}92\cdot10^{18}$

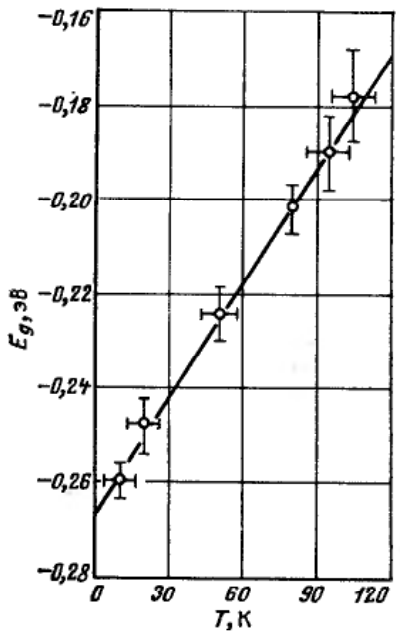


Рис. 22.115. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны в HgSe [223]

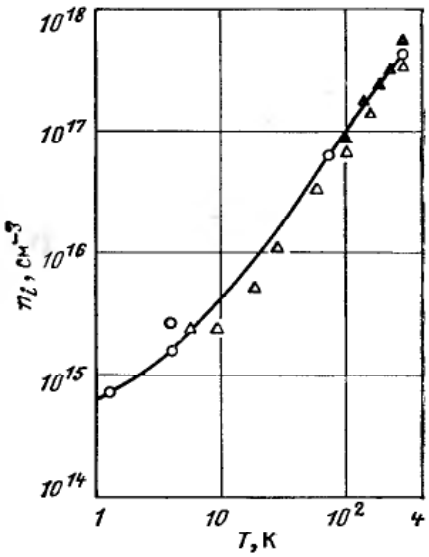


Рис. 22.118. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в HgTe:
сплошная линия — расчет [243]; точки — данные разных авторов

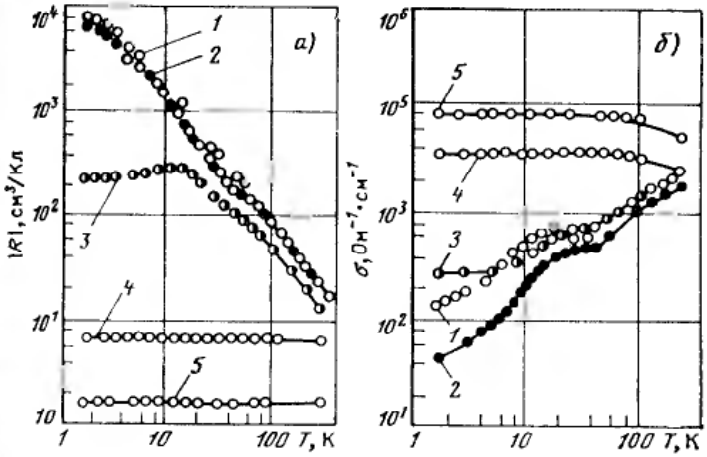


Рис. 22.119. Температурные зависимости коэффициента Холла (*а*) и проводимости (*б*) в HgTe [239]:
концентрация носителей возрастает от образца *1* к образцу *5*

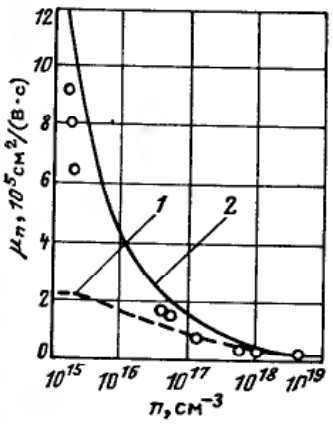


Рис 22.120. Зависимость подвижности электронов в HgTe при $T=4{,}2$ К от их концентрации. Расчет без учета (пунктирная кривая *1*) и с учетом (сплошная кривая *2*) экранирования заряженных центров за счет межзонных переходов [240]

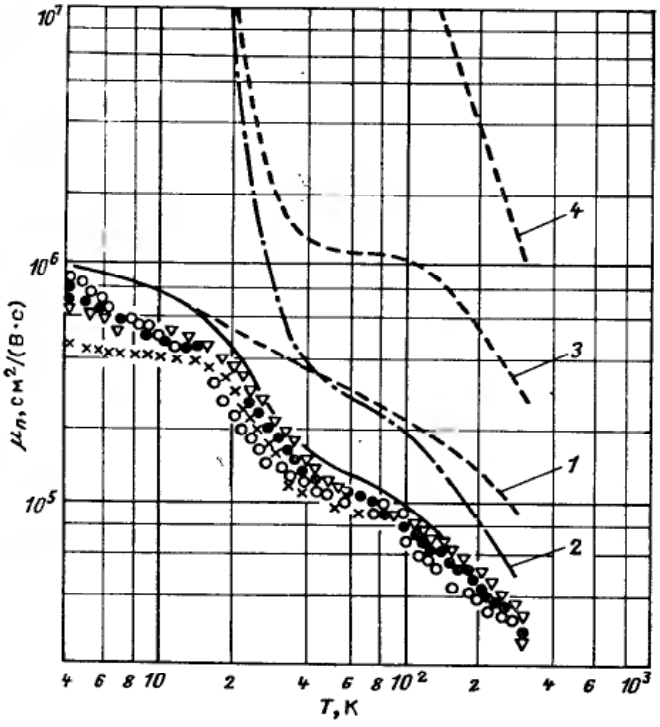


Рис. 22.121. Температурная зависимость подвижности электронов в HgTe. Расчет с учетом рассеяния электронов на заряженных центрах (*1*), полярных оптических (*2*), неполярных оптических (*3*) и акустических (*4*) фононах [244]:
точки — данные разных авторов

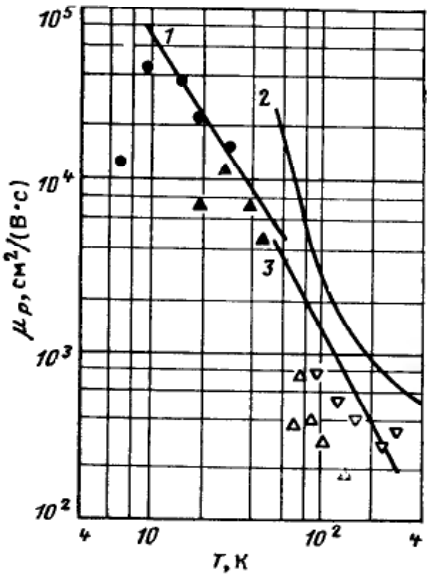


Рис. 22.122. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в HgTe в области собственной проводимости. Расчет с учетом рассеяния дырок на акустических и неполярных оптических фононах (*1*), неполярных оптических фононах (*2*) и суммарного рассеяния (*3*) [245]:
точки — данные разных авторов

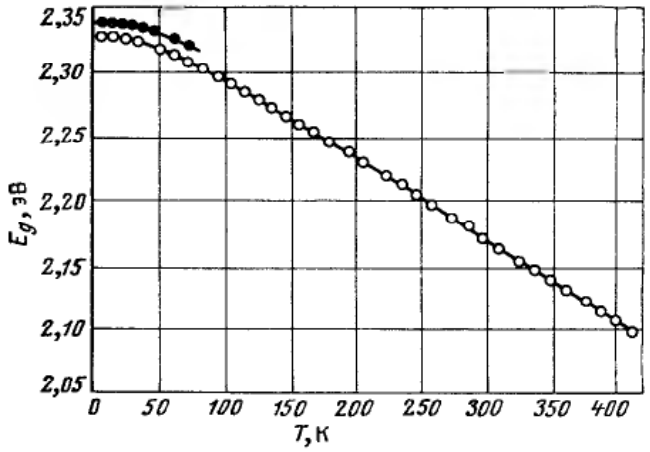


Рис. 22.123. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны HgI_2 [9]:
● — данные по пропусканию; ○ — данные по отражению

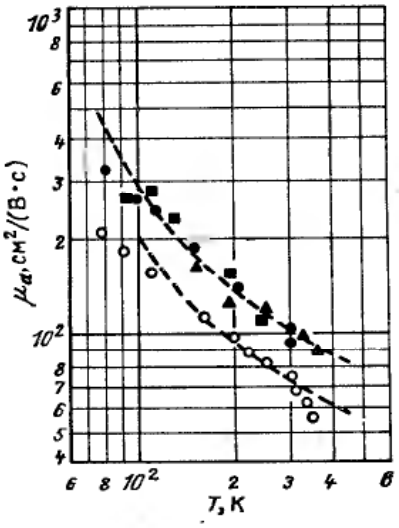


Рис. 22.124. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в HgI_2 [104]:
○ — $E \perp c$; остальные символы — $E \parallel c$, образцы различной толщины

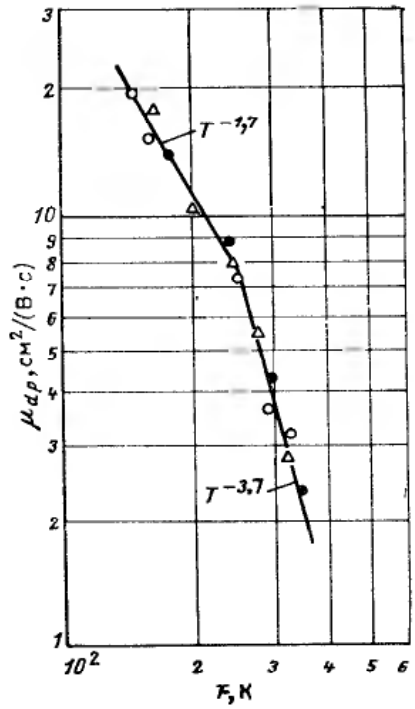


Рис. 22.125. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в HgI_2 [110]:
○ — $E \perp c$; остальные символы — $E \parallel c$

22.3.3. Соединения типа $A^{III}B^{IV}$—$A^{III}B^{VII}$

Полупроводники типа $A^{III}B^{V}$ характеризуются высокой подвижностью и малой эффективной массой электронов. Эти свойства обеспечивают им широкое применение. Изучены весьма подробно. Кристаллизуются в структуру типа сфалерита T_d^2. Зоны проводимости имеют, как правило, несколько минимумов, расположенных в точке $k=0$ и на осях [111] и [100].

В GaN, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs, InSb абсолютный минимум Γ расположен в центре зоны Бриллюэна ($k=0$) (см. рис. 22.126), абсолютный минимум Δ — на оси [100] в BP, AlP, AlAs, AlSb (см. рис. 22.127). Числовые значения параметров зонной структуры см. в табл. 22.15.

Валентная зона вырождена при $k=0$. Максимум зоны легких дырок V_2 находится в точке $k=0$; максимумы зоны тяжелых дырок V_1 расположены несколько выше (на 0,01—0,001 эВ) и лежат на осях [111]. Имеется также зона V_3, отщепленная за счет спин-орбитального взаимодействия Δ_{so}.

Полупроводниковые соединения III и VI групп обладают стехиометрическим составом двух типов: $A^{III}B^{VI}$ и $A_2^{III}B_3^{VI}$ и имеют много кристаллических модификаций.

Соединения $A^{III}B^{VI}$ делятся в основном на два класса: 1) с гексагональной структурой D_{6h}^4 (GaS, GaSe, InSe), 2) с тетрагональной структурой D_{4h}^{18} (InTe, TlS, TlSe, TlTe). Большинство кристаллов $A^{III}B^{VI}$ имеет сложную структуру.

Соединения $A_2^{III}B_3^{IV}$ имеют малую подвижность носителей (следствие дефектной структуры [150]) и обладают, как правило, проводимостью n-типа (за счет избыточного числа атомов халькогена). Эти соединения малочувствительны к легированию другими примесными атомами. Многие из этих соединений кристаллизуются в структуры нескольких типов.

О полупроводниковых свойствах халькогенидов редкоземельных элементов — см. [62]. Полупроводниковыми свойствами обладает соединение UO_2, кристаллизующееся в кубической структуре O_h^5 с $a=0{,}546$ нм [1], $E_g=1{,}3$ эВ [87], $\mu_p=10$ см²/(В·с) [249].

Таблица 22.14. **Электрофизические свойства карбида бора B_4C**

Кристаллическая структура		ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	ρ, Ом·см	T_D, К
Система, группа	a, c, нм					
Ромбоэдр., D_{3d}^5	0,560 (a); 1,212 (c) [242]	2,52 [216]	2723 [16]	1,64 [16]	0,1—10 [16]	1300 [288]

Таблица 22.15. **Полупроводниковые соединения $A^{III}B^{V}$ [292]**

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, нм	ρ, г/см³	$t_{пл}$, К	T_D, К	$\hbar\omega_l$, эВ	$\hbar\omega_t$, эВ
BP	Куб., T_d^2	0,4538	2,89 [242]	1400 ($T_{разл}$)	985	0,103	0,102
AlP	То же	0,547	2,85 [123] 2,40	2823	538 [178]	0,062	0,0545 [254]
Al As	» »	0,566	3,6 [121] 3,7	2013	417 [121]	0,050	0,0447 [254]
AlSb	» »	0,614	4,3	1327 [123]	292 [121]	0,042	0,0395 [254]
GaN	Гекс., C_{6v}^4	0,318 (a); 0,5166 (c) [242]	6,10 [242]	1500 [242] 2000	600	—	—
GaP	Куб., T_d^2	0,545	4,14	1740	446 [121]	0,0499	0,0455 [254]
GaAs	То же	0,569 [1]	5,4 [121]	1510 [123]	344 [121]	0,0362	0,0354 [254]
GaSb	» »	0,609 [1]	5,61	985 [123]	265 [121]	0,0298	0,0286 [254]
InN	Гекс., C_{6v}^4	0,353 (a) 0,569 (c) [242]	6,88 [242]	1200 [242] 1373	—	0,086	0,059
InP	Куб., T_d^2	0,586 [1]	4,79 [123]	1327 [123]	321 [121]	0,0435	0,038 [254]
InSb	То же	0,647	5,78 [121]	798 [123]	262 [121]	0,0244	0,0229 [254]
InAs	» »	0,606 [1]	5,68 [121]	1216 [123]	249 [121]	0,030	0,0272 [254]

Продолжение табл. 22.15

Соединение	ε_0	ε_∞	μ_n, см²/(В·с)	μ_p, см²/(В·с)	Абсолютный минимум зоны проводимости
BP	11,6 [242]	—	30—120	25—300	(100)
AlP	9,83 [254]	7,56 [254]	50 [28]	150 [28]	(100)
AlAs	11 [254]	9 [254]	75—300 1200 [115]	—	(100) [170]
AlSb	11,5 [27] 11,6 [254]	11,6 [170] 10,2 [254]	200 [121] 700 (77 K)	420 [27] 3700 (77 K)	(100) [170]
GaN	12,2 [214]	5,8 [214]	380 [214]	—	(000)
GaP	10,18 [170] 10,7 [254]	8,46 [170] 8,5 [254]	300 [123] 500 (77 K) [27]	75 [27] 420 (77 K)	(100) [170]
GaAs	12,53 [170] 12,9 [254]	11,6 [170] 10,9 [254]	8500 [27] 210 000 (77 K)	420 [27] 9000 (77 K)	(000) [170]
GaSb	15 [27] 16,1 [254]	15,2 [170] 14,4 [254]	4000 [27] 6000 (77 K)	1400 [27] 3600 (77 K)	(000) [170]
InN	—	9,3	20—200	—	(000)
InP	14 [27] 12,4 [254]	10,9 [170] 9,6 [254]	4600 [27] 40 000 (77 K)	150 [27] 1200 (77 K)	(000) [170]
InSb	16,8 17 [27]	15,6 [254] 15,7	78 000 [27] 1 200 000 (77 K)	750 [27] 10 000 (77 K)	(000) [170]
InAs	14,5 [27] 14,9 [254]	11,6 [170] 12,3 [254]	33 000 [27] 82 000 (77 K)	460 690 (77 K) [27]	(000) [170]

Продолжение табл. 22.15

Соединение	E_g, эВ	$E_{\Gamma\Delta}$, эВ	$E_{\Gamma\Lambda}$, эВ	Δ_{so}, эВ	$\frac{m_n^{(000)}}{m_0}$	$\frac{m_n^{(111)}}{m_0}$
BP	2,0	—	—	—	—	—
AlP	2,45 2,5 (2 K)	1,1	—	—	—	—
AlAs	2,14 2,23 (2 K)	1,0 1,3 [172]	—	0,29 [173]	0,124	—
AlSb	1,63 1,69 (4,2 K)	0,7 [171]	—	0,75 [170]	0.09 [123]	—
GaN	3,44 3,50 (1,6 K)	—	—	—	0,2—0,4 [214]	—
GaP	2,27 2,35 (0 K)	0,35 [170]	0,25 [185]	0,08 0,1 [171]	0,12 [123]	—
GaAs	1,43 1,52 (2 K)	0,38	0,5 [185]	0,33 [170]	0,067 [84]	—
GaSb	0,70 0,811 (2 K)	0,4 [170]	0.08	0,75 [84] 0,8 [171]	0,047 [170]	0,9 [170] 0,12 (⊥) 1,3 (∥)
InN	~ 2,1	—	—	—	0,11	—
InP	1,34 1,42 (2 K)	0,7 [170]	0,4 [84]	0,1 [171]	0,073 [84]	—
InSb	0,180 0,236 (4 K)	—	0,45—0,5 [84]	0,98 [170]	0,014 [170]	—
InAs	0,36 0,41 (0 K)	—	—	0,38 [84] 0,43 [170]	0,023 [170]	—

Продолжение табл. 22.15

Соединение	$\frac{m_n^{(100)}}{m_0}$	$\frac{m_{p1}}{m_0}$	$\frac{m_{p2}}{m_0}$	$\frac{m_{dp}}{m_0}$	$\frac{\partial E_g}{\partial T}$, 10^{-4} эВ/К	$\frac{\partial E_g}{\partial P}$, 10^{-11} эВ/Па	g_n
BP	—	—	—	—	—	—	—
AlP	—	0,63	0,20 0,39 [173]	—	—	—	—
AlAs	0,5 ÷ 0,8	0,5	0,22 [173] 0,26	—	—4	—	—
AlSb	0,33 0,25 (⊥) [84] 1; 1,64 (∥)	0,4 [123]	0,12 [170] 0,137 [173]	0,9 [173]	—3,5 —4 [123]	—1,6 [170] (100)	—
GaN	—	—	—	0,6÷1,0 [214]	—3,9 [242] —6,7	—4,2 (000)	—
GaP	0,22 (⊥) [84] 1,15 (∥)	0,5 [170] 0,56 [105]	0,13 [170] 0,16	—	—5,5 [170]	—1,7 [170] (100)	—
GaAs	1,2 [170] 0,3 (⊥) 2,0 (∥)	0,475 (231) 0,5 (170)	0,89 [232]	0,5 [173]	—5 (000) [170] —2.4 (100)	12,5 (000) [186] —8.7 (100) [170]	0,52—0,37 [84] 0,523 [170]
GaSb	—	0,23 [123] 0,36 (⊥) [233] 0,26 (∥) [233]	0,04 0,052 [233]	0,39 [173]	—3,5 (000) [170] +2 (111) [123]	14,5 (000) —10 (111)	—9
InN	—	—	—	—	—	—	—
InP	—	0,60 [105]	0,086 [170] 0,12 [105]	—	—2,9 [123] —4,6 [170]	4,6 (000) [170]	1,3 [292] —0,6 [230]
InSb	—	0,4 [123]	0,015 [123] 0,020 [231]	0,2 [173]	—2,8 [170] —2,9 [123]	15,5 (000) [170] 14,2 (000)	—50 [170] —48 [84]
InAs	—	0,4 [170]	0,025 [170]	0,33 [173]	—2,2 [170] —3,7 [123]	4,8 (000) 8,5 (000) [170] 3,2 (111)	—14,7 [84]

Таблица 22.16. **Свойства примесей в соединениях $A^{III}B^{V}$** [292]

Соединение	E_D, эВ	E_A, эВ
AlP	—	0,15 (?) 0,37 (?)
AlAs	0,05 (Mg) 0,06 (Zn) 0,07 (Si)	—
AlSb	0,068 (Te) 0,147 (Se) 0,160 (?)	0,033 (?) 0,041 (?) 0,102 (?)
GaN	0,017—0,042 (V_N)	0,225 (V_{Ga}) 0,41 (Hg) 0,750 (Li) 0,37; 0,48; 0,65; 1,02; 1,42 (Zn)
GaP	0,061; 0,091 (Li) 0,072 (Sn) 0,085 (Si) 0,105 (Se) 0,107 (S) 0,204 (Ge) 0,897 (O) 0,930 (Te)	0,052 (?) 0,054 (C) 0,057 (Be) 0,060 (Mg) 0,070 (Zn) 0,102 (Cd) 0,210 (Si) 0,265 (Ge) 0,530 (Cu)
GaAs	0,058 (Si, Se, Pb, V_{Ga}) 0,059 (Ge, Si, C)	0,027 (C) 0,028 (Be) 0,029 (Mg) 0,031 (Zn) 0,035 (Si, Cd) 0,040 (Ge) 0,113 (Mn) 0,167 (Sn)

Продолжение табл. 22.61

Соединение	E_D, эВ	E_A, эВ
GaSb	0,145 (S) 0,085 (Se) 0,020 (Te) } (111) ~0,3 (S) 0,2 (Se) <0,08 (Te) } (100)	0,0094 (Si) 0,013—0,015 (Ge) 0,008—0,130 (?)
InP	0,106 (Tl) 0,175 (Si) } (100)	0,031; 0,108 (Mg) 0,031; 0,143 (Be) 0,041 (C) 0,046 (Zn) 0,057 (Cd) 0,098 (Hg) 0,210 (Ge) 0,270 (Mn)
InAs	0,020—0,025 (?)	0,01 (Sn); 0,02; 0,035 (?) 0,014 (Ge) 0,02 (Si)
InSb	~0,007 (S) ~0,007 (Se) ~0,007 (Te) } (000) 0,05 (Te) 0,15 (Se) 0,25 (S) 0,55 (?) } (111)	0,008 (Co) 0,0091; 0,0099 (Zn) 0,00925 (Ge) 0,0095 (Mn) 0,0099 (Mg) 0,013 (Fe) 0,028; 0,056 (Cu) 0,030; 0,056 (Ag) 0,07 (Cr) 0,12 (?)

Таблица 22.17. **Полупроводниковые соединения $A^{III}B^{VI}$**

Соединение	Кристаллическая структура		ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	T_D, К	E_g, эВ
	Система, группа	a, b, c, нм				
GaS	Гекс., D^4_{6h}	0,3585 (a); 1,55 (c) [150]	3,75 [288]	1235 [288]	215 [288]	3,06 (77 К)
GaSe	То же	0,3755 (a); 1,594 (c) [150] β- и ε- GaSe [294]	5,03 [150]	1211 [294]	190 (0 К) [294]	2,09 [294]
GaTe	Моноклин., C^1_2	1,744 (a); 1,046 (b); 0,4077 (c) [294]	5,44 [150]	1097 [294] 1108 [150]	158 [294]	1,7 [152] 1,8 (0 К) [294]
InS	Орторомб., D^{13}_{2h}	0,394 (n); 0,444 (b); 1,064 (c) [150]	5,18 [150]	965 [150]	—	1,9 [294] 2,07 (4,2 К)
InSe	Гекс., D^4_{6h}	0,400 (a); ε : 1,670 (c); γ : 2,495 (c) [294]	5,55—5,72 [150]	888 [288] 933 [150]	190 [294]	1,18 1,32 (30 К) [294]
InTe	Тетр., D^{18}_{4h}	0,8437 (a); 0,7139 (c) [150]	6,29 [150]	966 [150]	—	0,26—0,36 [288]
TlS	То же	0,779 (a); 0,679 (c) [150]	7,61 [150]	623 [150]	—	1,36 [294]
TlSe	» »	0,803 (a); 0,701 (c) [150]	8,2 [288] 8,15 [294]	607 [288] 623 [294]	180 [294]	0,75 [294] 0,7 [32]
TlTe	» »	1,294 (a); 0,6158 (c) [150]	8,42 [150]	573 [288] 603 [150]	—	—

Соединение	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-5} эВ/Па (10^{-6} эВ/ат)	m_n/m_0	m_p/m_0	μ_n, см²/(В·с)	μ_p, см²/(В·с)	ε_0 [294]	ε_∞ [294]
GaS	—7,2 [288]	5 [288]	—	12 [294]	80 [294]	5,9 ($E \parallel c$) 10,0 ($E \perp c$)	5,3 ($E \parallel c$) 6,7 ($E \perp c$)
GaSe	—4 [10]	0,51 [288] 0,5 ($\perp$) [294] 1,6 ($\parallel$) [294]	1,34 [288] 0,8 ($\perp$) [294] 0,2 ($\parallel$) [294]	80 ($\parallel c$) [294] 300 ($\perp c$)	210 ($\parallel c$) [294] 60 ($\perp c$)	6 18 ($E \parallel c$) 10,6 ($E \perp c$)	5,76 ($E \parallel c$) [294] 7,44 ($E \perp c$)
GaTe	—(4—5) [294]	—	1,34 [288]	50 [31] $\frac{\mu_n}{\mu_p} \simeq 10$ [288]	15 [152] 40 [150]	10,58 ($E \parallel c$) 9,66 ($E \perp c$)	7,29 ($E \parallel c$) [294] 6,97 ($E \perp c$)
InS	—6 [10] —7,9 [294]	0,4 [294]	—	50 [294]	—	—	15,2 [294]
InSe	—4,2 [288]	0,12—0,16 [294]	0,5 ($\perp c$) [294] 1,5 ($\parallel c$)	900 [294]	$1{,}4 \cdot 10^7\, T^{-2/3}$ ($\perp c$) [294]	5,4 ($E \parallel c$) 8,6 ($E \perp c$)	4,9 ($E \parallel c$) [294] 6,2 ($E \perp c$)
InTe	—	0,09 [294]	0,26 [294]	$\frac{\mu_n}{\mu_p} = 0{,}75$ [294]	150 [294]	—	14,7 ($E \parallel c$) [294] 14 ($E \perp c$)
TlS	—	0,07 [294]	0,11 (m_{dp}) [294]	$\frac{\mu_n}{\mu_p} = 0{,}4$ [294]	20 [294]	—	—
TlSe	—4,5 [288] —3,9 [32]	0,3 (m_{dn}) [32]	0,6 (m_{dp}) [32]	$\frac{\mu_n}{\mu_p} \simeq 0{,}4$ [288]	15—150 [288]	15—20 ($E \parallel c$) 34—44 ($E \perp c$)	12 [294]
TlTe	—	0,03 (m_{dn}) [294]	0,5 (m_{dp}) [294]	—	60 [294] 1120 (4,2 К)	—	—

Таблица 22.18. **Полупроводниковые соединения $A_2^{III}B_3^{VI}$**

Соединение	Кристаллическая структура		ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К	μ_n, см²/(В·с)
	Система, группа	a, b, c, нм					
α-Al_2O_3	Гекс, D_{3d}^6	0,4758 (a); 1,295 (c) [242]	—	2323 [242]	2,5 [242]	—	—
α-Al_2S_3	Гекс., C_6^2	2,3—2,5 [288]	2,32 [242]	1373 [242]	4,1 [242]	—11,5 [242]	—
α-Al_2Se_3	Моноклин., C_3^4	1,168 (a); 0,673 (b); 0,733 (c); $\beta = 121{,}1°$ [150]	3,91 [150]	1253 [150]	3,1 [150]	—11,2 [10]	—
Al_2Te_3	Гекс., C_{6v}^4	0,408 (a); 0,694 (c) [150]	4,5 [150]	1168 [150]	2,2 [150] 2,3 [123]	—	—
β-Ga_2S_3	То же	0,3685 (a); 0,6028 (c) [288]	3,65—3,74 [150]	1398 [150]	2,84 [123]	—7 [58]	28 [150]
α-Ga_2Se_3	Моноклин., C_3^4	1,114 (a); 0,641 (b); 0,704 (c); $\beta = 121{,}2°$ [150]	4,92 [150]	1293 [150]	1,75 [150]	—5 [16]	10 [16]
α-Ga_2Te_3[*1]	Куб., T_d^2	0,589 (a) [150]	5,57 [150]	1065 [150]	1,56 [31] 1,4 [150]	—6 [242]	340 [123]
In_2O_3[*2]	Куб.	1,012 (a) [132]	7,04 [132]	2270 [132]	2,8 [132]	—8 [132]	270 [60]
β-In_2S_3	Куб., O_h^5	1,072 (a) [150]	5,92 [150]	1363 [150]	1,1 [150]	—7 [10]	<100 [150]
α-In_2Se_3	Гекс.	1,60 (a); 1,924 (c) [150]	5,67 [150]	1173 [150]	1,2 [10]	—4 [10]	125 [150]
α-In_2Te_3[*3]	Куб., T_d^2	1,840 (a) [121]	5,8 [121]	940 [150]	1,02 [150] 1,12 [16]	—4 [242]	10 [150] 15—70 [16]

[*1] $\mu_p = 26$ см²/(В·с); $m_n/m_0 = 0{,}39$; $m_p/m_0 = 0{,}23$ [123].
[*2] $m_{dn}/m_0 = 0{,}55$ [60].
[*3] $m_n/m_0 = 0{,}7$; $m_p/m_0 = 1{,}1$ [150].

Таблица 22.19. **Электрофизические свойства галогенидов таллия** [294]

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, нм	ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	T_D, К	E_g, эВ	m_n/m_0^*	m_p/m_0^*	μ_n, см²/(В·с)	μ_p, см²/(В·с)	ε_0	ε_∞
TlCl	Куб., O_h^5	0,384	7,02	704	393	3,2	0,5—0,7	0,6—1	20 5000 (4,2 К)	67 000 (4,8 К)	32,7	4,76
TlBr	То же	0,399	7,45	733	290	2,64 (4,2 К)	0,5	0,7	30 40 000 (1,8 К)	4 35 000 (1,8 К)	30,6	5,34

* Поляронная масса.

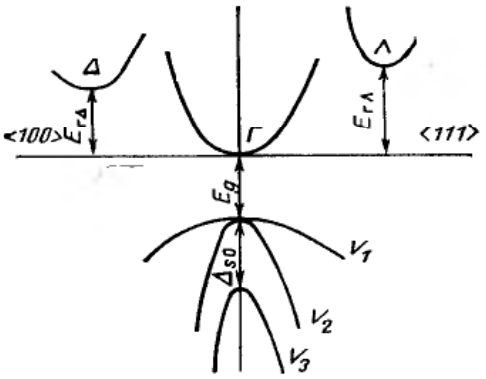


Рис. 22.126. Зонная структура GaN, GaAs, GaSb, InN, InP, InAs, InSb [121, 170, 171]

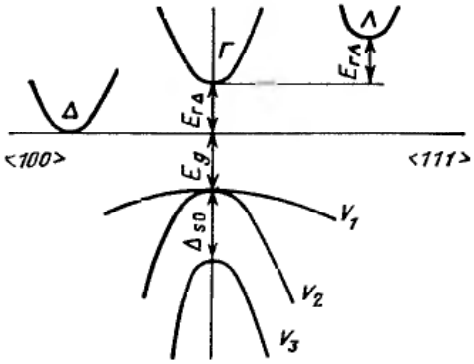


Рис. 22.127. Зонная структура BP, AlP, AlAs, AlSb [121, 170—172]

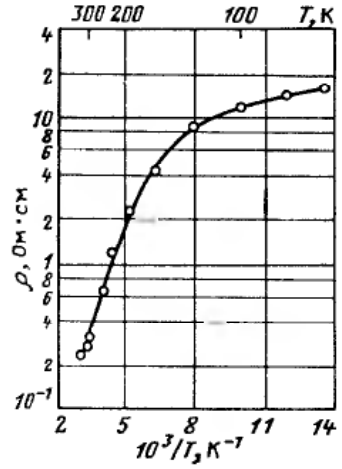


Рис. 22.128. Температурная зависимость удельного сопротивления монокристалла n-BP [247]

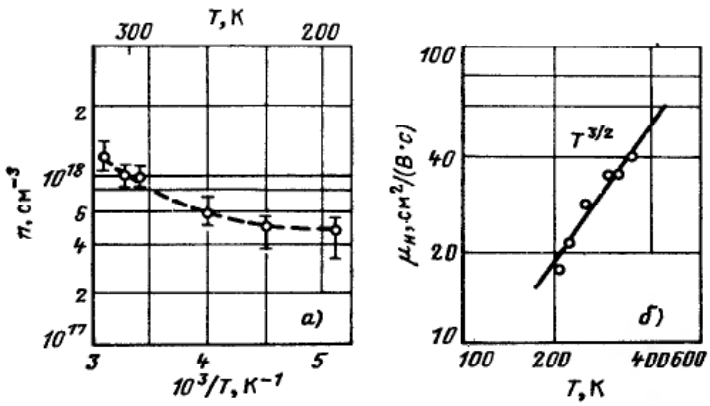


Рис. 22.129. Температурные зависимости концентрации электронов ($а$) и их холловской подвижности ($б$) в монокристалле BP [247]

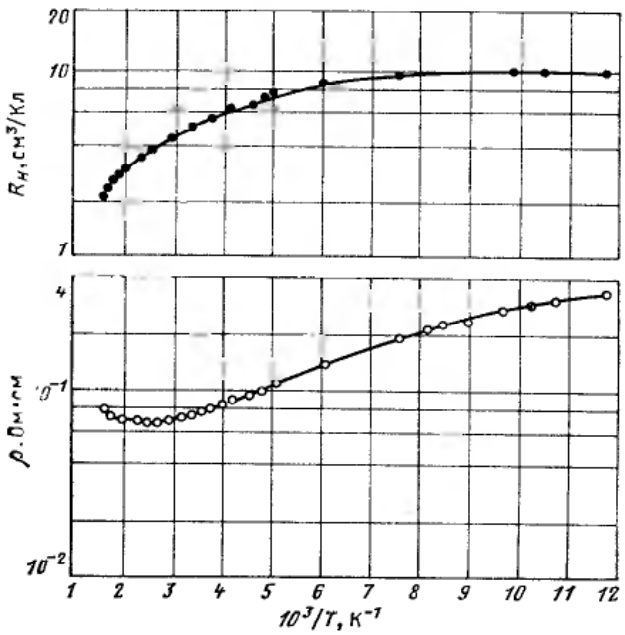


Рис. 22.130. Температурные зависимости коэффициента Холла и удельного сопротивления n-AlP [248]

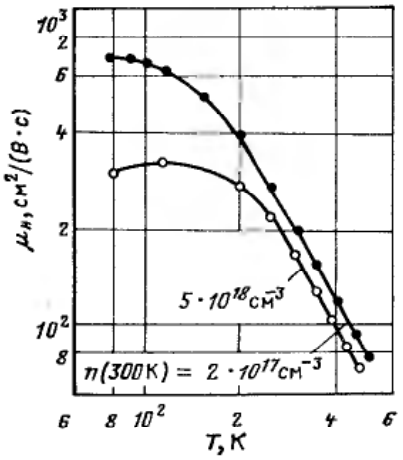


Рис. 22.131. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в AlSb [250]

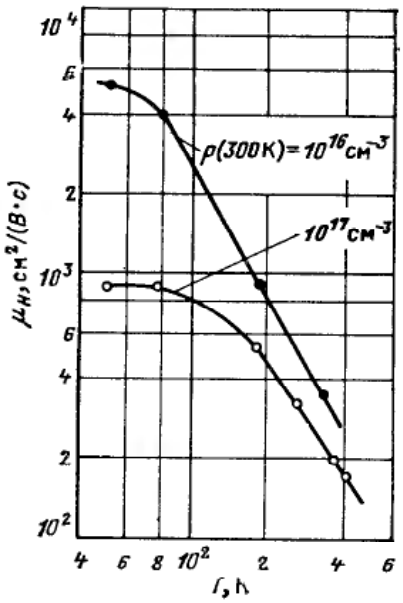


Рис. 22.132. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в AlSb [251]

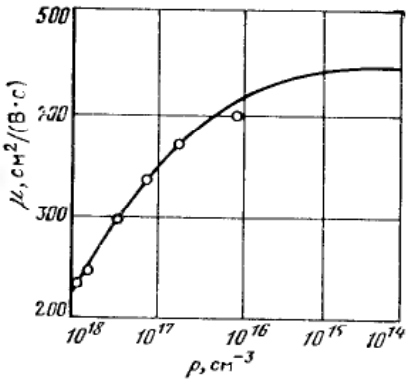


Рис. 22.133. Зависимость подвижности дырок в AlSb при $T = 293$ К от их концентрации [170]:
сплошная линия — расчет для комбинированного рассеяния на акустических фононах и ионизированных примесях

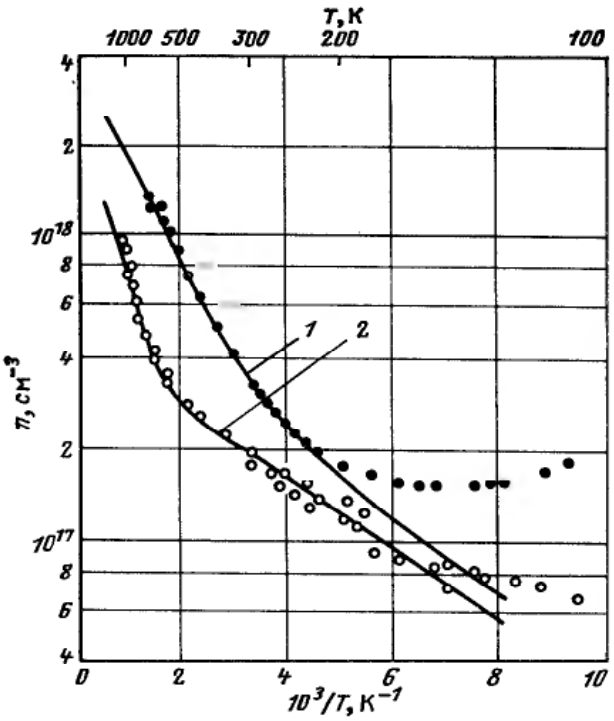


Рис. 22.134. Температурная зависимость концентрации электронов для кристаллических пленок GaN [253]:
сплошные линии — расчет по модели с двумя типами доноров; *1, 2* — скорость роста 0,75 и 0,45 мкм/мин соответственно

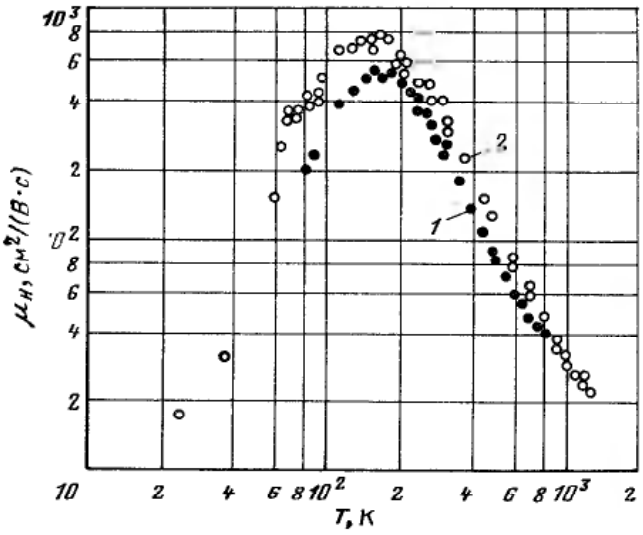


Рис. 22.135. Температурная зависимость холловской подвижности электронов для двух кристаллов GaN [253]:
кристаллы те же, что на рис. 22.134

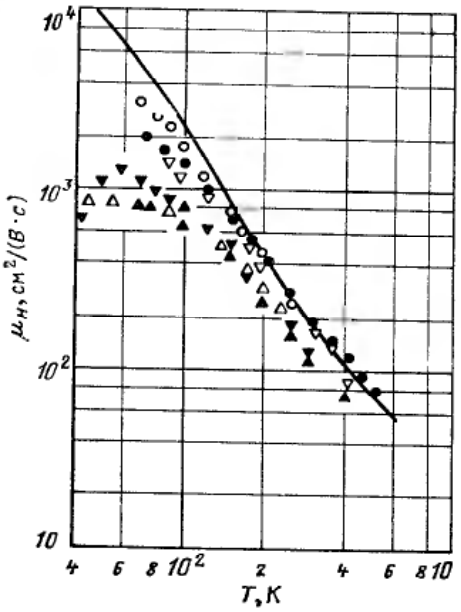


Рис. 22.136. Температурные зависимости холловской подвижности электронов в различных кристаллах GaP [256]:
точки — данные разных работ, сплошная линия — расчет

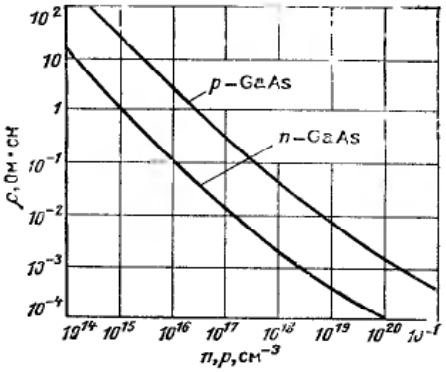


Рис. 22.138. Зависимости удельного сопротивления n- и p-GaAs при $T=300$ К от концентрации электронов или дырок [257]

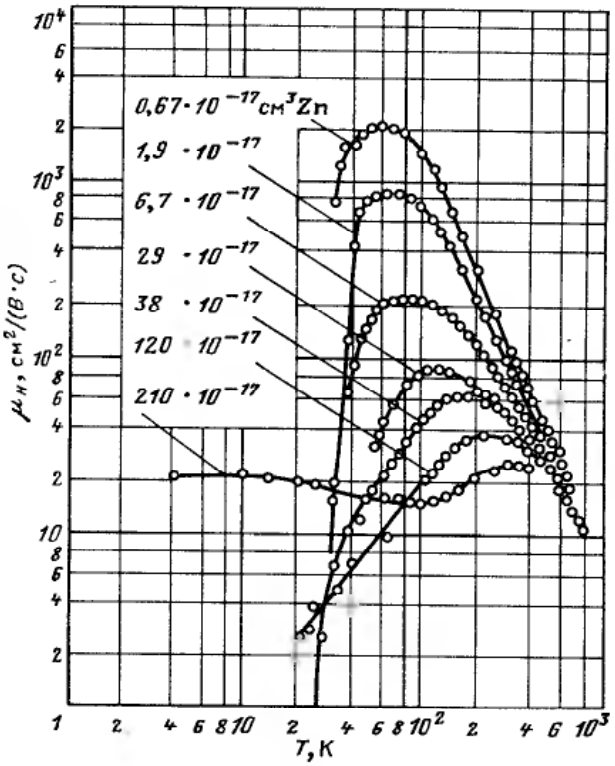


Рис. 22.137. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в различных легированных Zn кристаллах GaP при разной концентрации Zn [256]

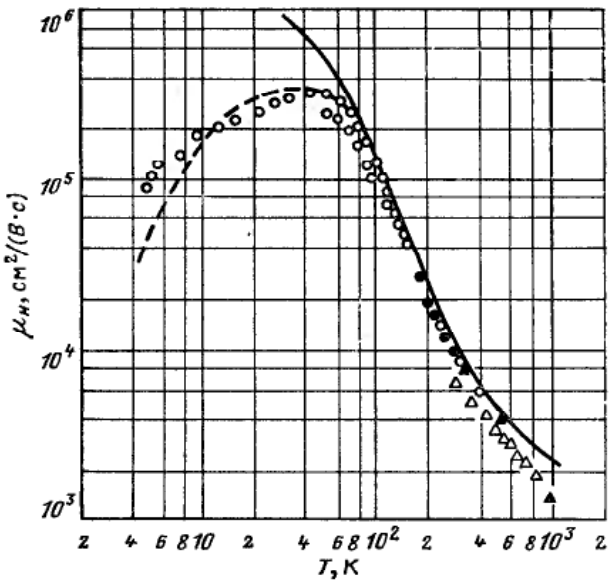


Рис. 22.139. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в GaAs:
линии — расчет без учета (———) и с учетом (– – –) рассеяния электронов на ионизированных примесях; точки — данные разных работ [258]

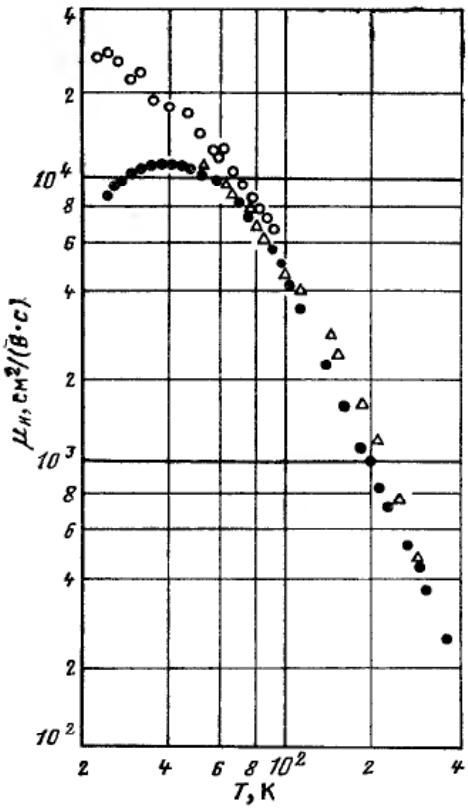


Рис. 22.140. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в GaAs [259]:
концентрация акцепторов и доноров N_A и N_D, 10^{14} см$^{-3}$: ○ —3,3 и 1,8; △ — 11 и 3; ● — 7 и 5,5

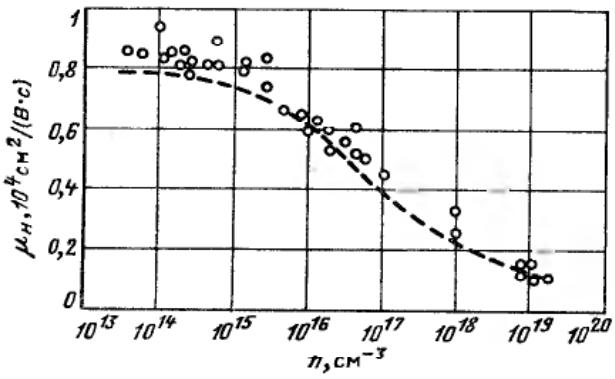


Рис. 22.141. Зависимость холловской подвижности электронов при $T=300$ К от концентрации электронов в легированных Sn кристаллах GaAs:
линия — расчет [260]

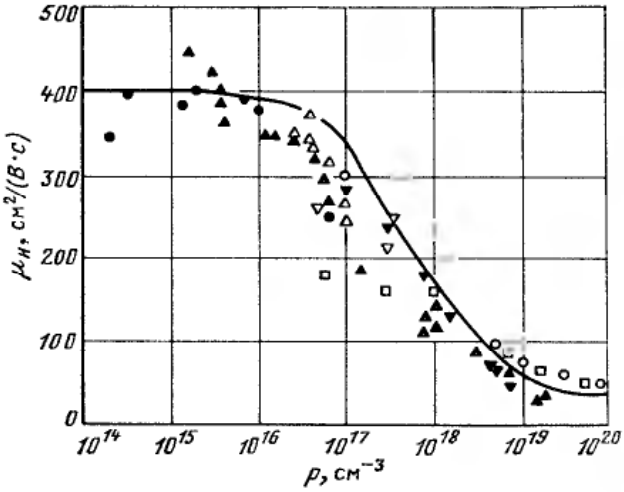


Рис. 22.142. Зависимость холловской подвижности дырок при $T=300$ К от концентрации дырок в GaAs:
сплошная линия — расчет [259]; точки — данные разных работ

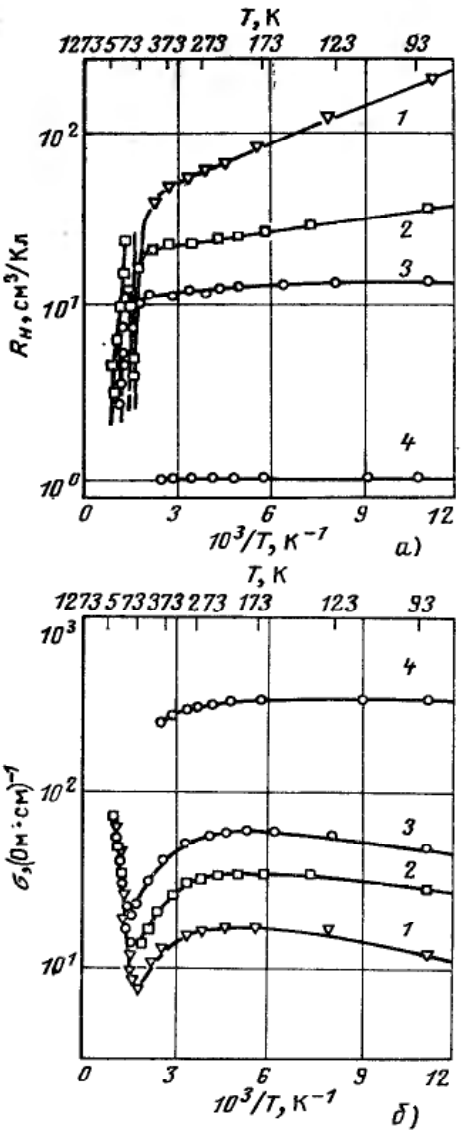


Рис. 22.143. Температурные зависимости коэффициента Холла (*а*) и проводимости (*б*) кристаллов GaSb [170]:
концентрация растет от *1* к *4*

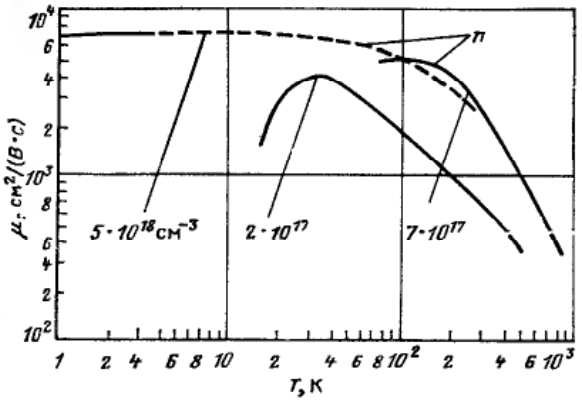


Рис. 22.144. Температурные зависимости подвижности носителей в GaSb с различной концентрацией носителей n- и p- (нижняя кривая) типа [127]

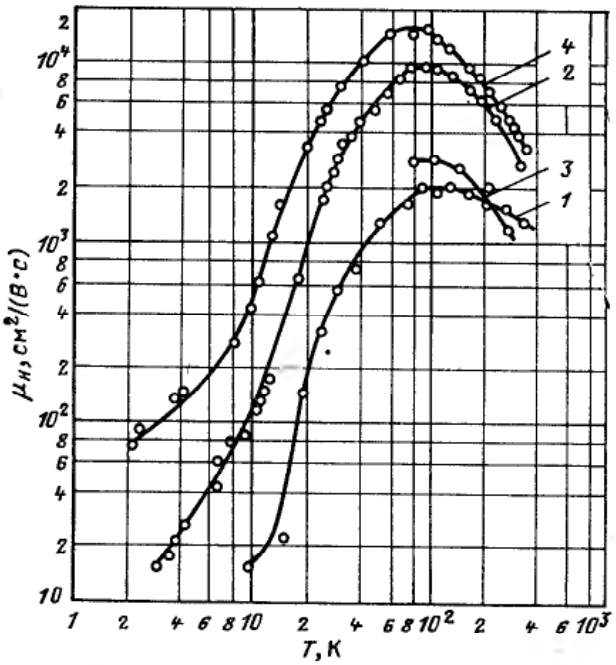


Рис. 22.146. Температурная зависимость холловской подвижности электронов в InP [262]:
n (300 К), 10^{15} см$^{-3}$: 1—2 (Cu); 2 — 5 (Fe); 3—5 (Te, Cu); 4—10 (Co)

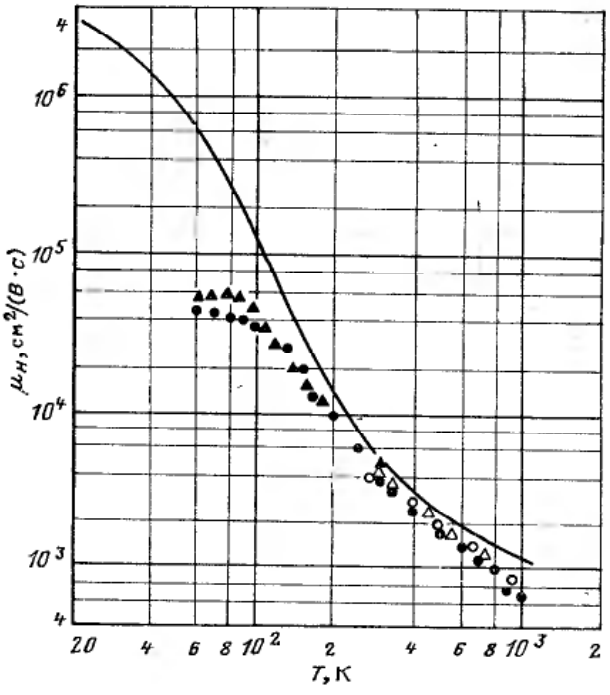


Рис. 22.145. Температурная зависимость холловской подвижности электронов InP:
сплошная линия — расчет [261]; n (300 К), 10^{15} см$^{-3}$: ● — 2; △ — 1,7; ○ — 4; △ — 6

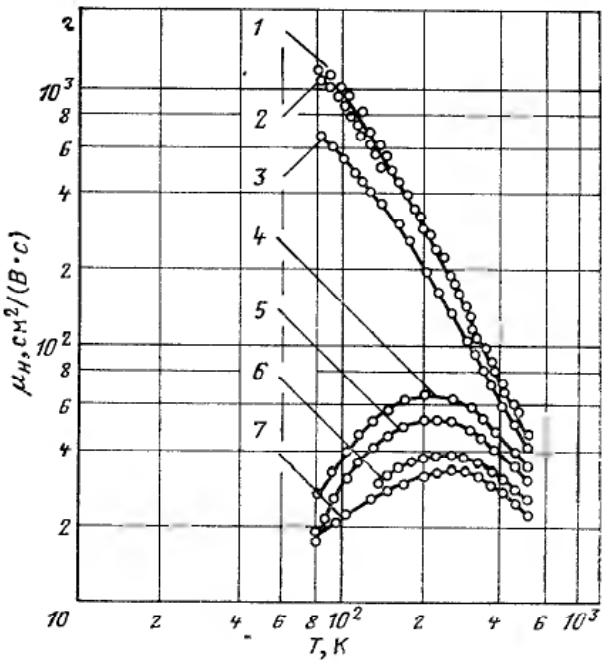


Рис. 22.147. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в InP [263]:
p (300 К), 10^{17} см$^{-3}$: 1—0,7; 2—1; 3—3; 4—13; 5—30; 6—56; 7—85

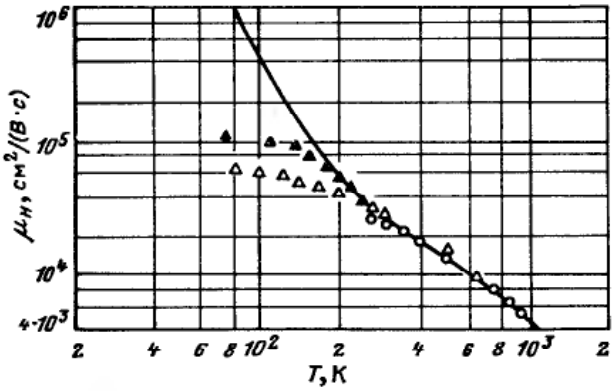


Рис. 22.148. Температурные зависимости холловской подвижности электронов в InAs:
сплошная линия — расчет [255]; n (300 К), 10^{16} см$^{-3}$; △ — 1,7; ○ — 4; ▲ — 0,4

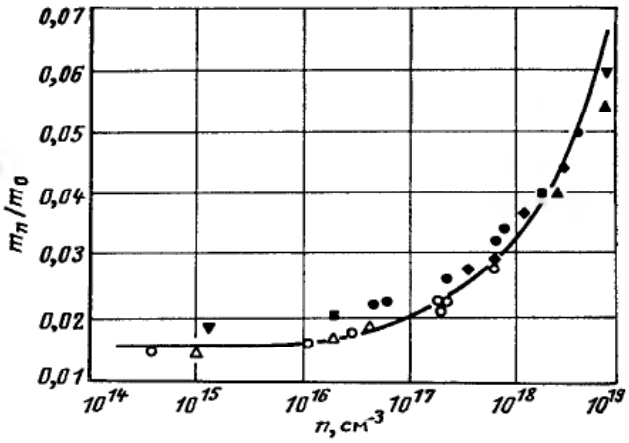


Рис. 22.151. Зависимость эффективной массы электронов в n-InSb от концентрации электронов [264]:
сплошная линия — расчет по теории Кейна; точки — данные из разных работ

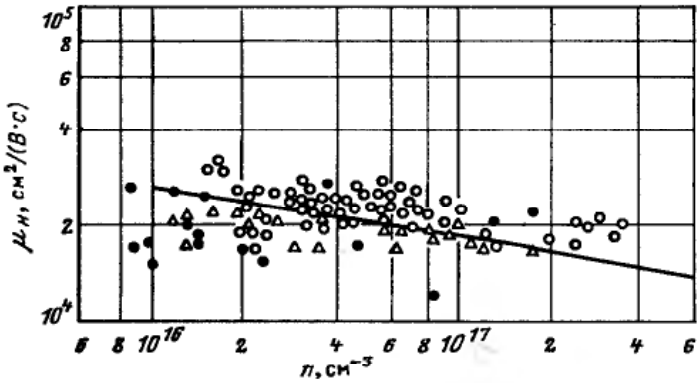


Рис. 22.149. Зависимость холловской подвижности электронов при $T=300$ К от концентрации электронов в кристаллах InAs с различной степенью компенсации $K=N_A/N_D$ [247]:
сплошная линия — расчет; ○ — $K<0,15$; △ — $0,15<K<0,3$; ● — $K>0,3$

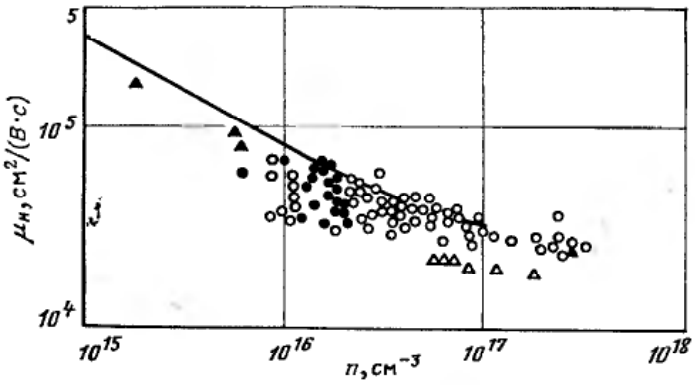


Рис. 22.150. Зависимость холловской подвижности электронов при $T=77$ К от концентрации электронов в кристаллах InAs [247]:
сплошная линия — расчет; ● — нелегированный образец; ○ — легирован Cu; △ — легирован Sn—Zn; ▲ — эпитаксиальные пленки

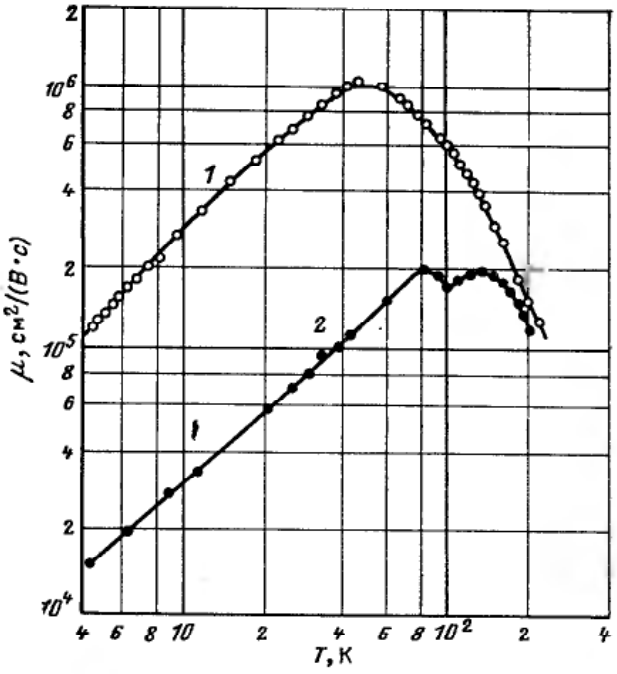


Рис. 22.152. Температурные зависимости подвижности электронов в чистом (*1*) и легированном (*2*) (концентрация примеси $>10^{14}$ см$^{-3}$) кристаллах InSb [265]

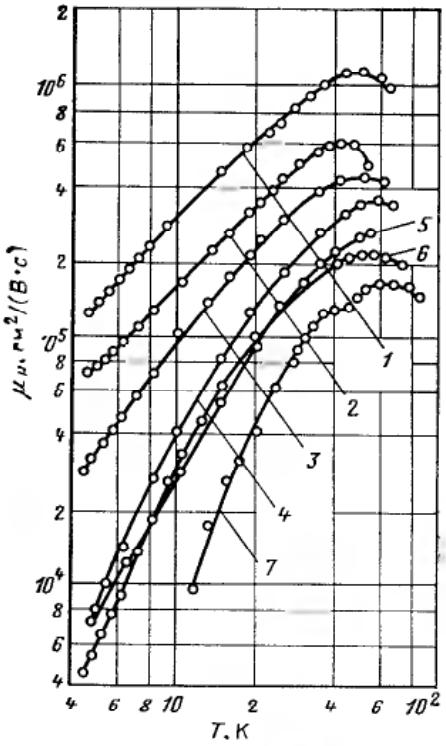
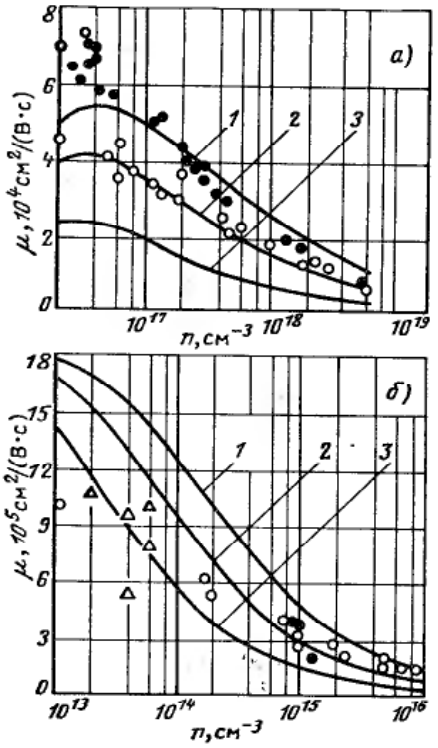


Рис. 22.153. Температурные зависимости подвижности электронов в кристаллах InSb с различной концентрацией примесей [266]:

№ образца	$N_D - N_A$, см$^{-3}$	$N_D + N_A$, см$^{-3}$	N_A / N_D	μ_n (30 K), см²/(В·с)
1	$1{,}2 \cdot 10^{14}$	$6{,}5 \cdot 10^{14}$	0,50	830 000
2	$1{,}9 \cdot 10^{14}$	$1{,}3 \cdot 10^{15}$	0,75	480 000
3	$9{,}8 \cdot 10^{13}$	$1{,}6 \cdot 10^{15}$	0,88	330 000
4	$1{,}4 \cdot 10^{13}$	$2{,}3 \cdot 10^{15}$	0,99	160 000
5	$1{,}6 \cdot 10^{13}$	$2{,}6 \cdot 10^{15}$	0,99	150 000
6	$3{,}6 \cdot 10^{12}$	$1{,}9 \cdot 10^{15}$	0,98	150 000
7	$6{,}2 \cdot 10^{11}$	$2{,}7 \cdot 10^{15}$	0,99	92 000



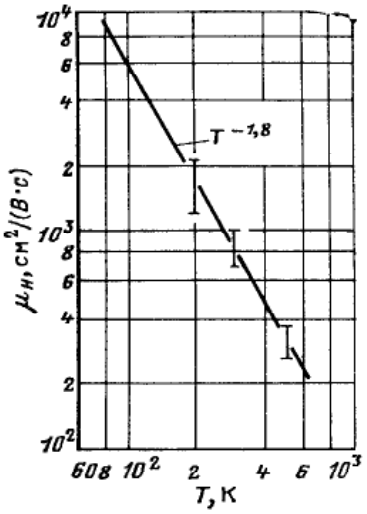


Рис. 22.155. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в InSb [268]

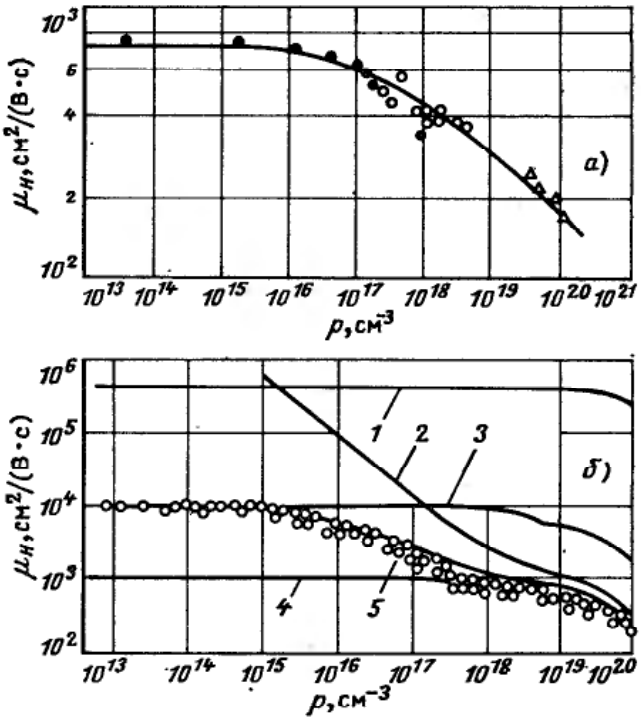


Рис. 22.156. Зависимости подвижности дырок в InSb при $T=290$ К (*а*) и $T=77$ К (*б*) от концентрации дырок [268—270]:

сплошные линии (*б*) — расчет с учетом рассеяния дырок на оптических фононах (*1*), примесных ионах (*2*), акустических фононах (*3* — $E_1=7$ эВ; *4* — $E_1=21$ эВ), примесях и акустических фононах (*5*); точки — данные из разных работ

←

Рис. 22.154. Зависимости подвижности электронов в InSb при $T=300$ К (*а*) и $T=77$ К (*б*) от концентрации электронов [267]:

сплошные линии — расчетные зависимости дрейфовой подвижности при значениях $(N_D^+ + N_A^-)/(n+p) = 1$ (*1*); 2 (*2*); 5 (*3*); точки — данные из разных работ

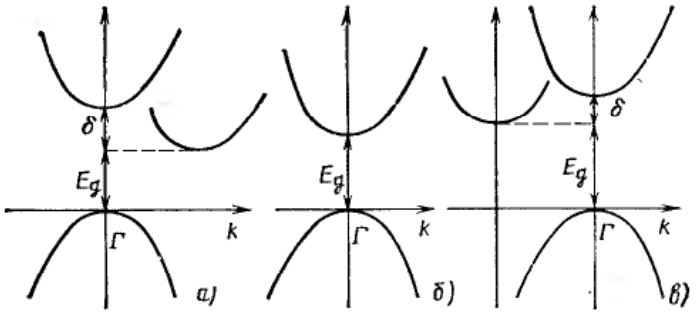


Рис. 22.157. Зонная структура GaS, GaSe, InS, TlS (*а*), GaTe (*б*), InSe (*в*) [294]:

Соединение	GaS	GaSe	GaTe	InS	InSe	TlS
δ, эВ	—	0,025	—	0,55	0,076	0,2

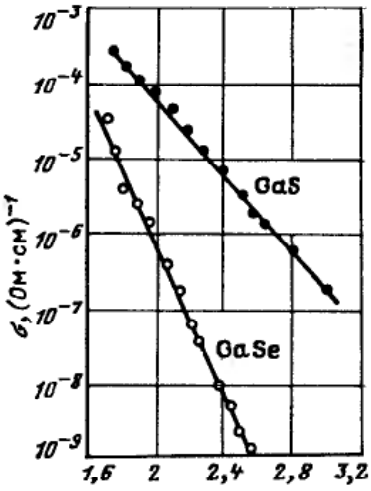


Рис. 22.158. Температурные зависимости проводимости кристаллов *n*-GaS и *n*-GaSe в плоскости слоев [271]

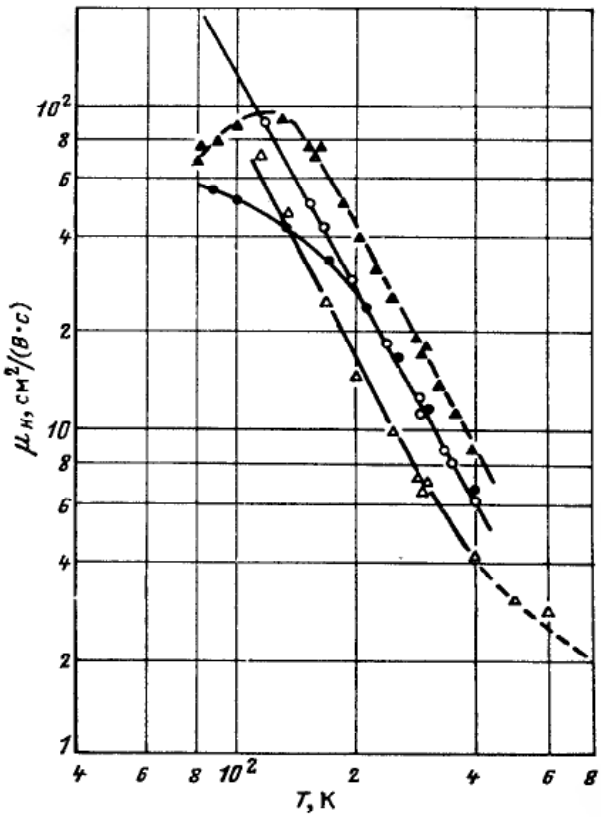


Рис. 22.159. Температурная зависимость холловской подвижности носителей в кристаллах GaS (ток — вдоль слоев, магнитное поле — поперек слоев).

Метод получения и тип кристалла:

▲ — иодный транспорт, *n*-тип; ● — осаждение из газовой фазы, *n*-тип; △, ○ — осаждение из газовой фазы, *p*-тип [272, 273]

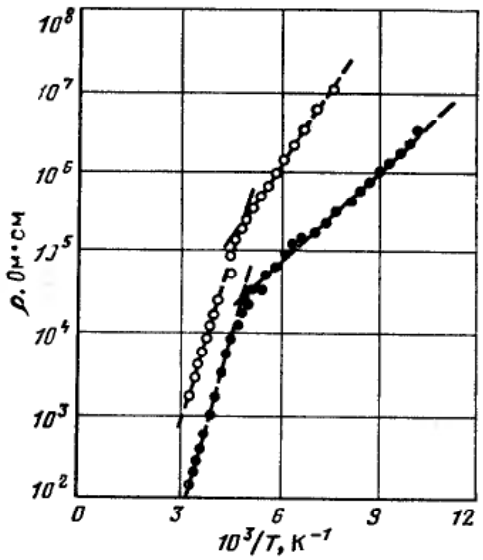


Рис. 22.160. Температурные зависимости удельного сопротивления кристалла GaS вдоль (●) и поперек (○) слоев [274]

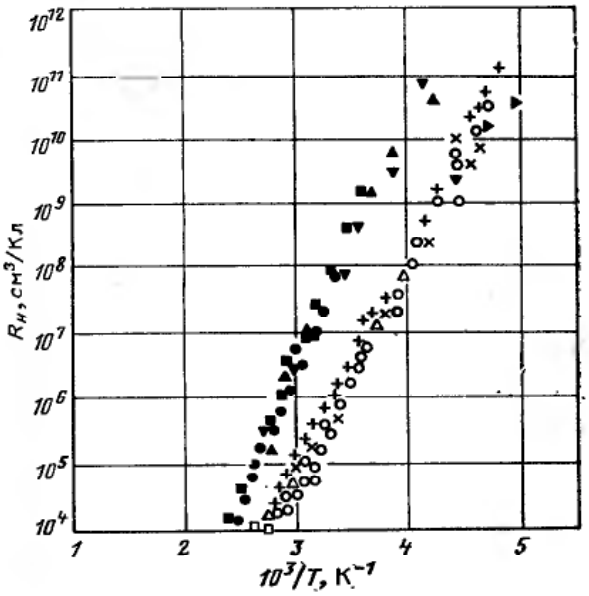


Рис. 22.161. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов *p*-GaSe (ток — вдоль слоев, магнитное поле — поперек слоев) [275]:

×, +, ○, △, □ — нелегированные кристаллы GaSe; легирующая добавка: ■, ● — 10% Ge; ▲, ▼ — 5% Sn; ▶ — 10^{-3}% Zn

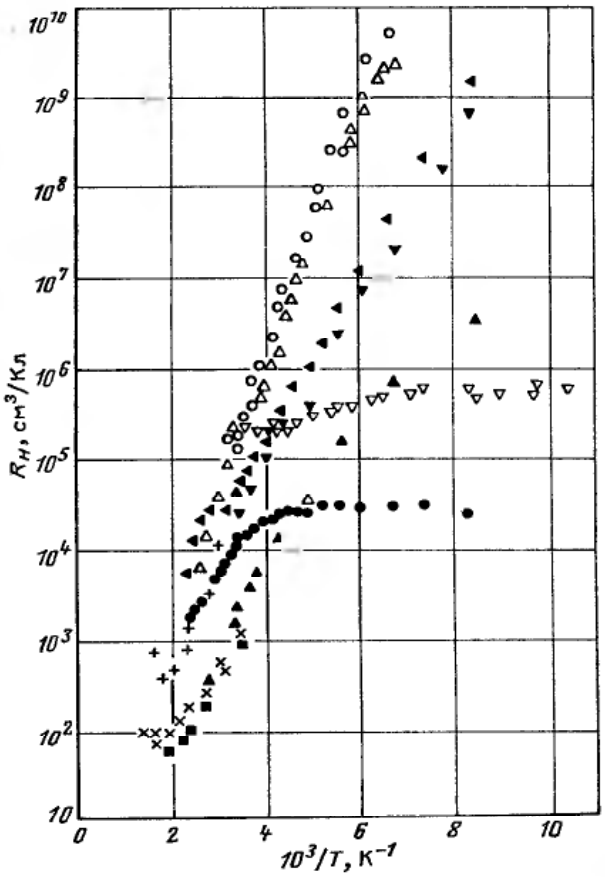


Рис. 22.162. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов *p*-GaSe (ток — вдоль слоев, магнитное поле — поперек слоев) [275]:

○, △, ▽ — нелегированные кристаллы GaSe; легирующая добавка: ●, ◀ — 10% Zn; ▼ — 0,5% Zn; ▲ — 0,1% Zn; ■, × — 10^{-2}% Zn; + — $3 \cdot 10^{-3}$% Zn

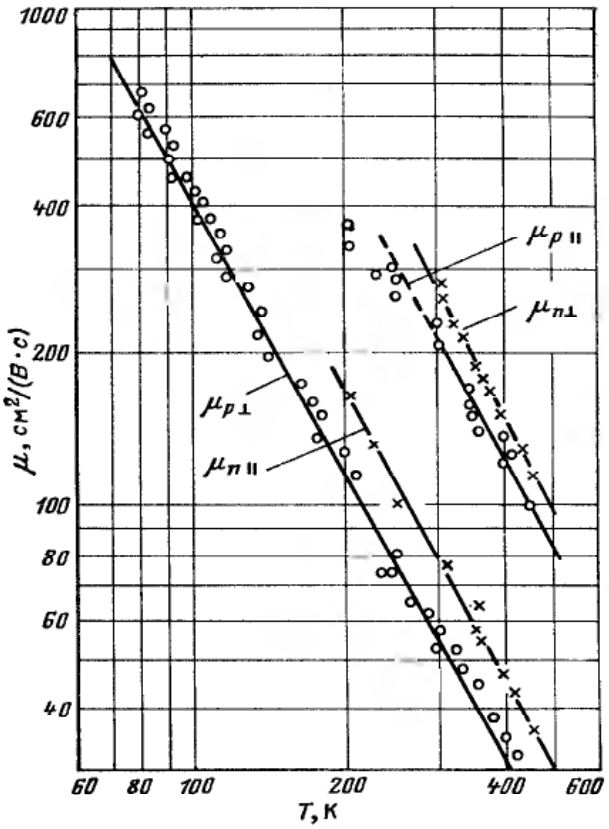


Рис. 22.163. Температурные зависимости подвижности носителей в GaSe [276]:

$\mu_{p\perp}$, $\mu_{n\perp}$, $\mu_{p\parallel}$, $\mu_{n\parallel}$ — холловские подвижности дырок и электронов вдоль и поперек слоев

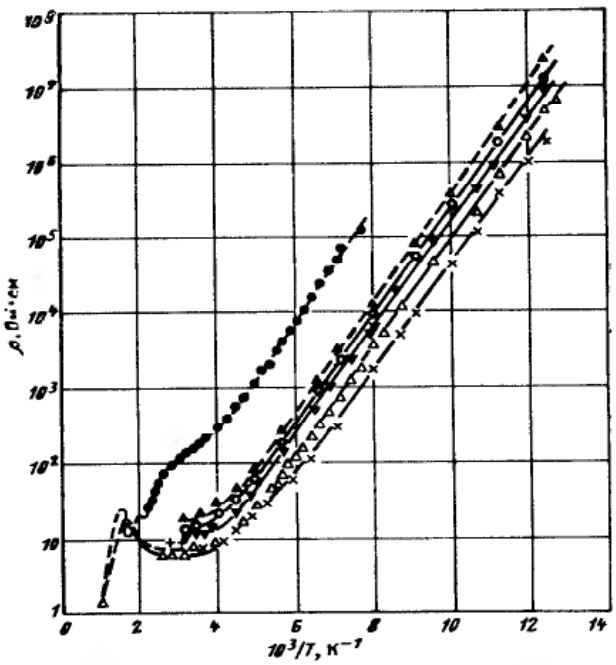


Рис. 22.164. Температурные зависимости удельного сопротивления различных кристаллов GaTe [277]:

зачерненные символы — поперек слоев, остальные символы — вдоль слоев; кристаллы: ●, △ — травление; ▼ + — слабое травление, ▲, ○ — холодная обработка; × — легирование Cu

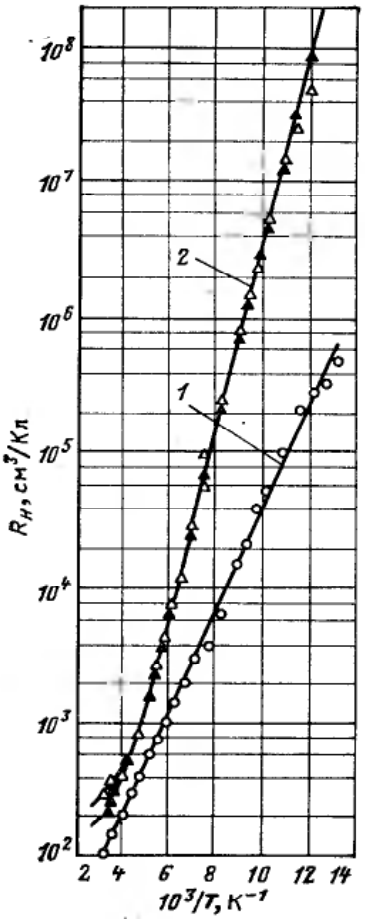


Рис. 22.165. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов GaTe (ток — вдоль слоев; магнитное поле — поперек слоев) [278]:
образцы *1* и *2* — из различных партий

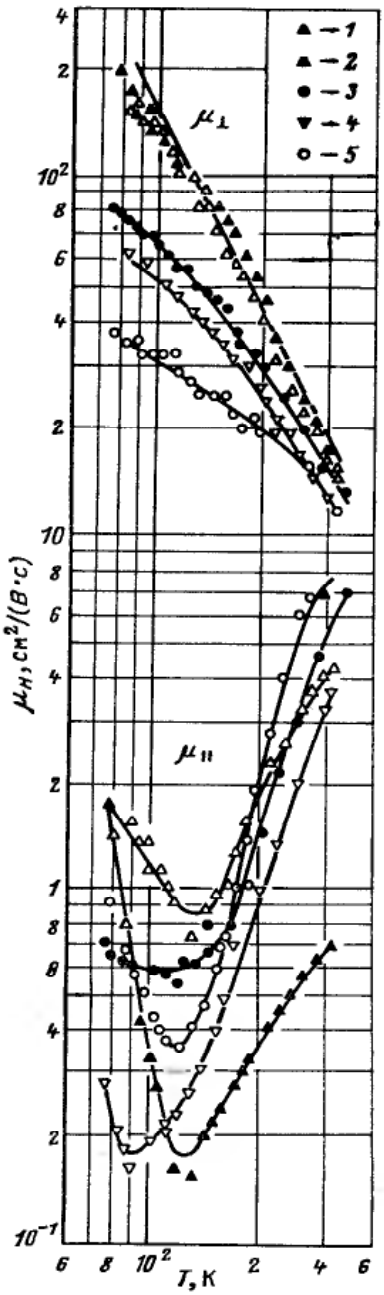


Рис. 22.167. Температурная зависимость холловской подвижности дырок для кристаллов *p*-GaTe [278]:
$\mu_\perp$ — вдоль слоев; $\mu_\parallel$ — поперек слоев; концентрация носителей растет от *1* к *5*

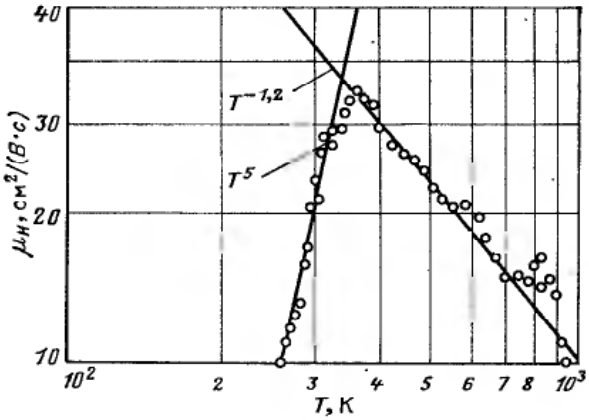


Рис. 22.166. Температурная зависимость подвижности электронов в поликристаллических образцах GaTe, состоящих из больших монокристаллических областей (ток — вдоль слоев) [279]

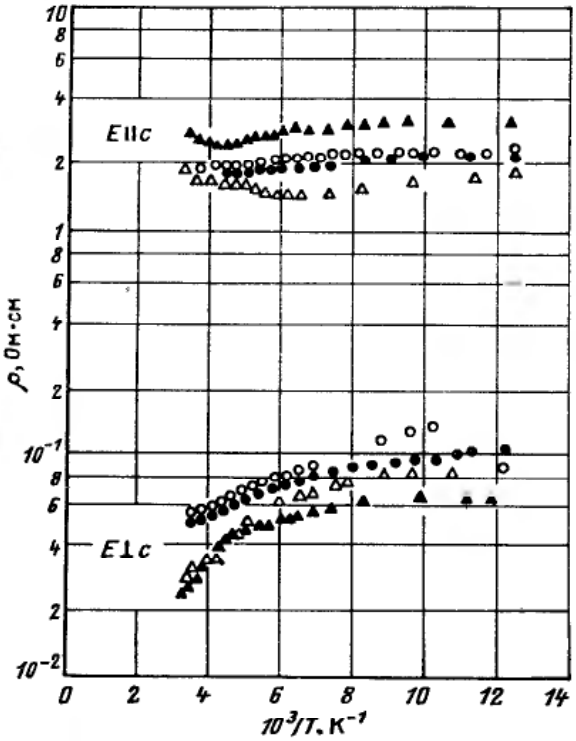


Рис. 22.168. Температурная зависимость удельного сопротивления кристаллов InS, выращенных из расплава [280]:
концентрация электронов (T=300 K), 10^{18} см$^{-3}$: ▲ — 9; △ — 6,5; ○ — 5,5; ● — 4,5

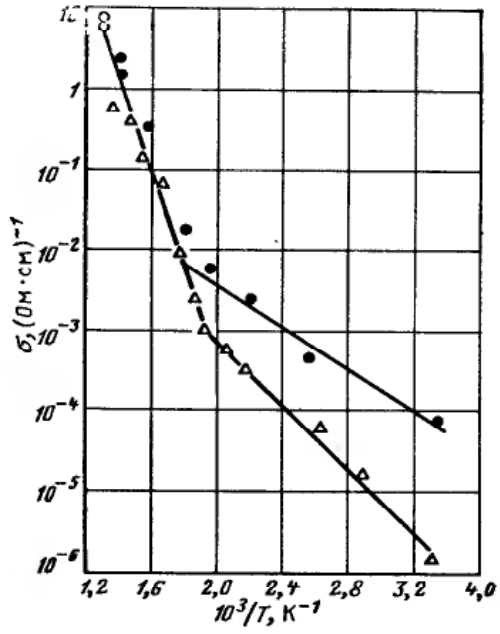


Рис. 22.169. Температурная зависимость проводимости различных кристаллов InSe вдоль (△) и поперек (●) оси c [281]

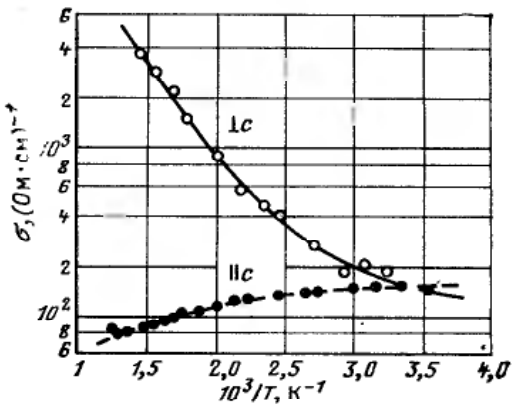


Рис. 22.170. Температурная зависимость проводимости InTe вдоль ($\parallel c$, ○) и поперек ($\perp c$, ●) оси c [282]

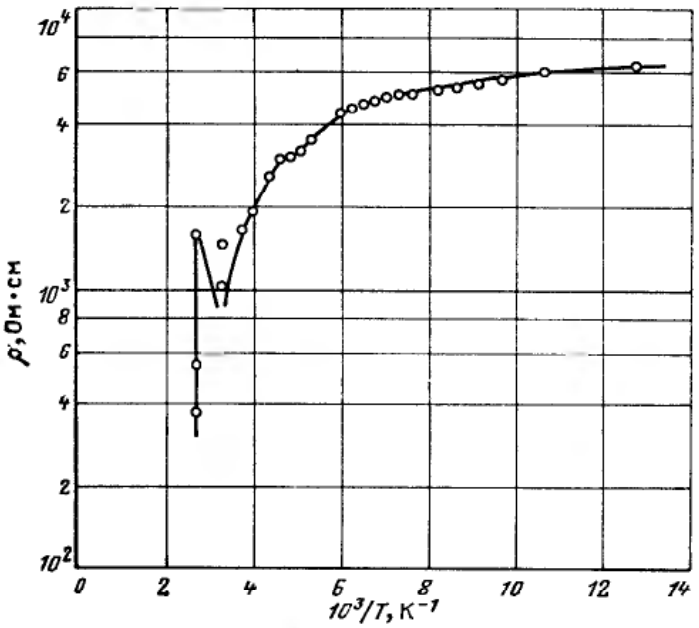


Рис. 22.171. Температурная зависимость удельного сопротивления различных кристаллов TlS (ток — вдоль оси) [283]

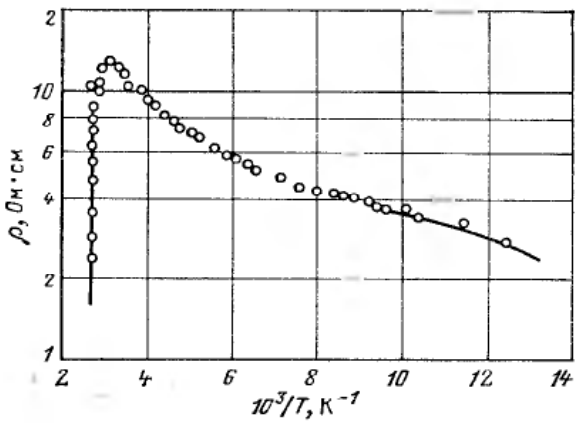


Рис. 22.172. Температурная зависимость удельного сопротивления ElSe (ток — вдоль оси) [283]

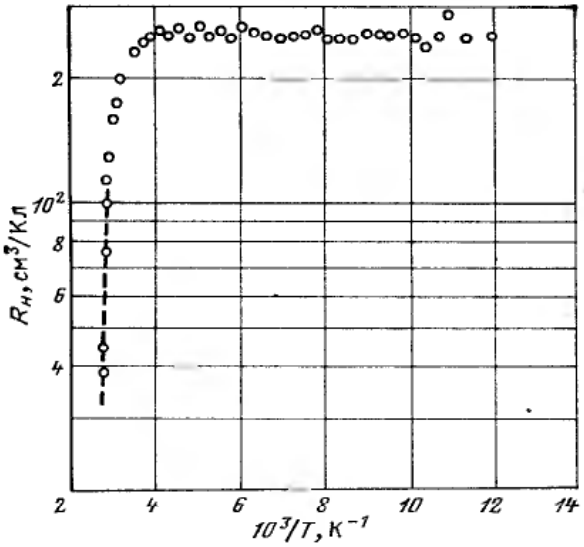


Рис. 22.173. Температурные зависимости коэффициента Холла для различных кристаллов TlSe в поле $B=13$ кГс (ток — вдоль оси c, магнитное поле — поперек оси c в направлении [110]) [283]

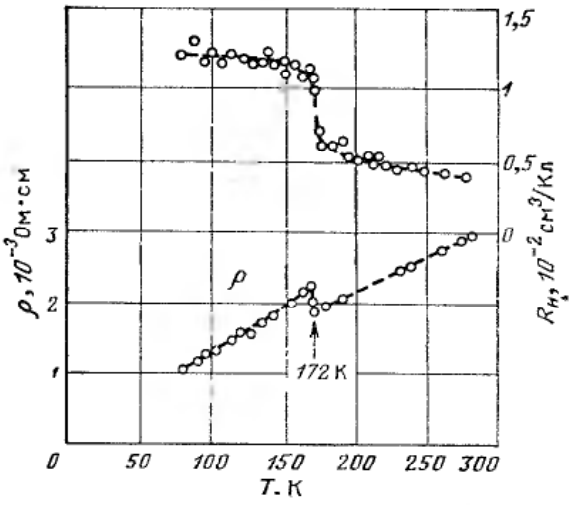
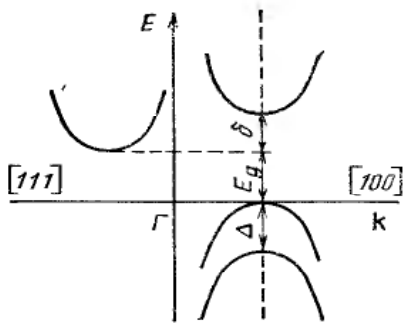


Рис. 22.174. Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла для поликристаллического образца TlTe [284]. При $T=172$ К происходит фазовый структурный переход от тетрагональной (при $T>172$ К) структуры к орторомбической



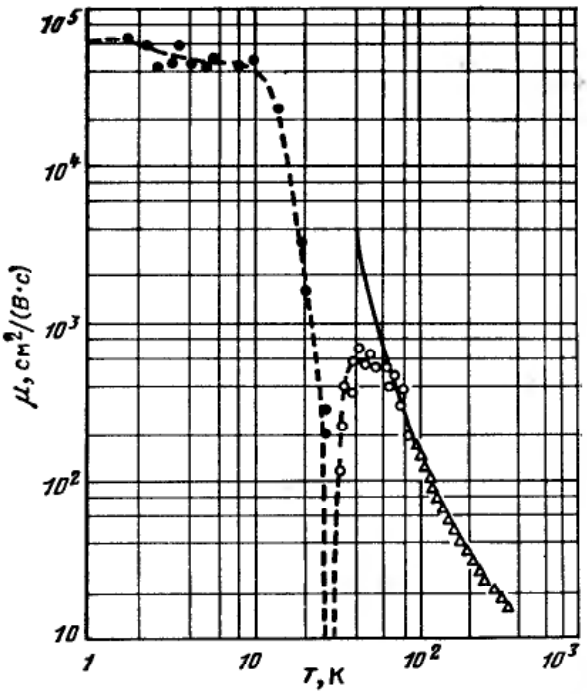


Рис. 22.176. Температурная зависимость холловской (●, ○) и дрейфовой (△) подвижности фотовозбужденных носителей в TlCl [285]

● — дырки; ○, △ — электроны

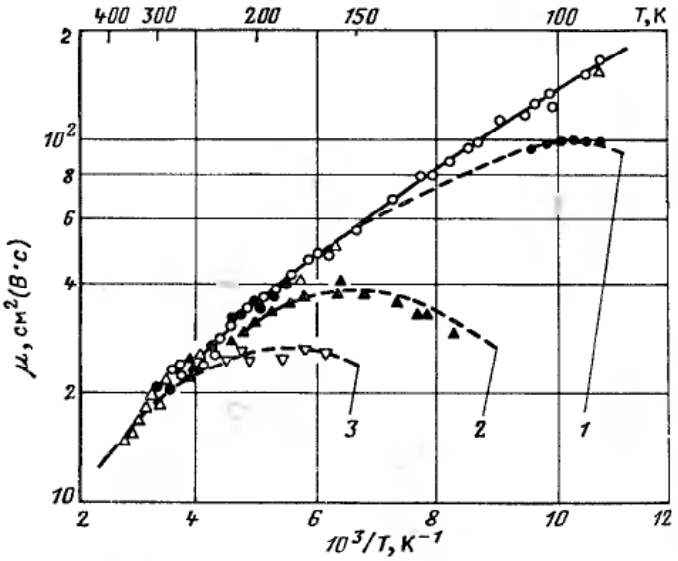


Рис. 22.177. Температурная зависимость дрейфовой подвижности электронов в кристаллах TlCl с различной концентрацией ловушек, см$^{-3}$:

1 — $8{,}4\cdot10^{14}$; *2* — $1{,}2\cdot10^{16}$; *3* — $3{,}3\cdot10^{16}$, сплошная линия — чистый кристалл [286]

Рис. 22.175. Зонная структура TlCl, TlBr [294]:

Соединение	TlCl	TlBr
Δ, эВ	1,7	1,04
δ, эВ	0,2	0,27

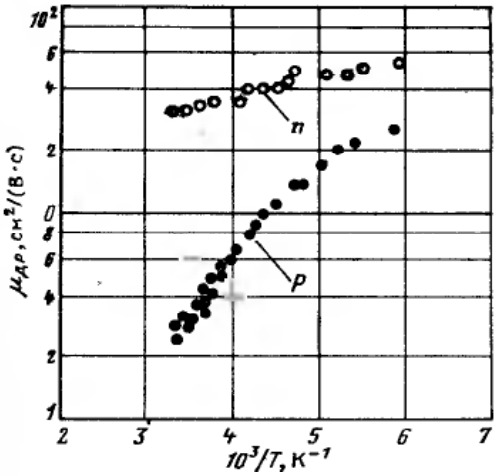


Рис 22.178. Температурные зависимости дрейфовых подвижностей электронов и дырок в TlBr [287]

22.3.4. Соединения типа $A^{IV}B^{IV}$—$A^{IV}B^{VI}$

Из полупроводниковых соединений типа $A^{IV}B^{V}$ известно Sn_3As_2, кристаллизующееся в ромбоэдрической решетке ($T_{пл}$=870 К, E_g=0,47 эВ, μ_p=270 см²/(В·с) [100]).

Наиболее изученными соединениями типа $A^{IV}B^{VI}$ являются халькогениды свинца (PbS, PbSe, PbTe), кристаллизующиеся в гранецентрированной кубической решетке O_h^5. Зонная структура — прямая, причем абсолютные экстремумы зон расположены на краю зоны Бриллюэна в направлении [111] (см. рис. 22.181). Вблизи экстремумов поверхности постоянной энергии представляют собой эллипсоиды вращения (их эквивалентное число равно 4 для каждой зоны). Валентная зона расщеплена на две подзоны; нижняя из них (подзона тяжелых дырок) имеет максимум внутри зоны Бриллюэна на осях [111] и проявляет себя в материалах p-типа при повышенных температурах (для PbTe при $T \geqslant 400$ К). Халькогениды свинца обладают аномально высокой диэлектрической проницаемостью.

Некоторые соединения рассматриваемого типа характеризуются непрямой зонной структурой, как это имеет место, например, в SnS, SnSe (см. рис. 22.216), или обладают сложной зонной структурой (см. рис. 22.211 для SnTe). Тип проводимости рассматриваемых соединений часто определяется отклонением от стехиометрии.

Таблица 22.20. **Электрофизические свойства SiC**

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, c, нм	$T_{пл}$, К	ρ, г/см³	T_D, К	$\hbar\omega_l$, эВ	$\hbar\omega_t$, эВ	ε_0
α-SiC	Гекс., C_{6v}^4	0,308 (a); 1,511 (c) [292]	3073 [132]	3,21 [193]	1200 [193]	0,119 [194]	0,098 [194]	10,2 [124] 9,8 [194]
β-SiC	Куб., T_d^2	0,436 [1]	2600 [124] (β → α)	3,21 [132]	1430 [288]	0,103 [292]	0,094 [292]	9,7 [288]

Продолжение табл. 22.20

Соединение	ε_∞	E_g, эВ	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К	m_n/m_0	m_p/m_0	μ_n, см²/(В·с)	μ_p, см²/(В·с)
α-SiC	6,9 [124] 6,73 [194]	2,86 [292]	—3,8 [85]	0,25 ($\perp c$); 1,5 ($\parallel c$) [292]	1,0 [123] 1,2 [124]	230 [34]	70 [16]
β-SiC	6,5 [288]	2,4 (2 К) [292]	—5,8 [15,79]	0,24 ($\perp c$); 0,65 ($\parallel c$) [292]	0,59 [15]	1000 [288]	—

Таблица 22.21. **Электрофизические свойства TiO_2, Ti_2O_3, TiO**

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, c, нм	$T_{пл}$, К	ρ, г/см³	ε_0	ε_∞	T_D, К
TiO_2 (рутил)	Тетр., D_{4h}^{14}	0,454 (a); 0,296 (c)	2113	4,28 [209]	140 ($\perp c$) 260 ($\parallel c$) 89 ($\perp c$) 173 ($\parallel c$)	7 [211] 9 ($\perp c$) [25] 6,8 ($\parallel c$)	670 [242]
Ti_2O_3	Триг., D_{3d}^6	0,516 (a); 1,357 (c)	2400	4,93—5,13 [288]	—	—	—
TiO	Куб., O_h^5	0,4177	2010	5,82 [288]	—	—	—

Соединение	E_g, эВ	μ_n, см²/(В · с)
TiO_2 (рутил)	3,0 [16]	0,16 ($\perp c$) [25] 0,57 ($\parallel c$)
Ti_2O_3	0,02 [288]	~1000 (4,2 К) [288]
TiO	0,1 [288]	~1 [288]

Таблица 22.22. **Электрофизические свойства окиси и халькогенидов свинца [125, 294]**

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, c, нм	ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	δ_n, эВ	δ_p, эВ	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К	$\partial E_g/\partial P$, 10^{-11} эВ/Па (10^{-6}эВ/ат	$m_{n\parallel}/m_0$	$m_{n\perp}/m_0$	$m_{p\parallel}/m_0$	$m_{p\perp}/m_0$
PbO	Тетр., D_{4h}^7	0,397 (a); 0,502 (c)	9,53	1163	2,07 2,03 (4,2 К)	—	—	1	—	—	—	—	—
PbS	Куб., O_h^5	0,594	7,6	1387	0,41 0,31 (77 К) 0,29 (4,2 К)	1,46	1,67	4; 5,2	—8; —9,1	0,105	0,080	0,105	0,075
PbSe	То же	0,612	8,3	1355	0,278 0,176 (77 К) 0,145 (4,2 К)	1,36	1,72	4; 5,1	—8; —8,6	0,070	0,040	0,068	0,034
PbTe	» »	0,650	8,2	1190	0,32 0,22 (77 К) 0,19 (4,2 К)	1,11	0,77	4,5	—7,5; —8	0,22	0,024	0,24	0,025

Соединение	μ_n, см²/(В · с)	μ_p, см²/(В · с)	n_i (300 К), 10^{16} см$^{-3}$	ε_0	ε_∞	$\hbar\omega_l$, МэВ	$\hbar\omega_t$, МэВ	T_D (200 К), К	g_n^*	g_p^*
PbS	610 11 000 (77 К) 68 500 (4,2 К)	620 15 000 (77 К) 80 000 (4,2 К)	2,0	175	17	26,3	8,2	227	12	13
PbSe	1000 15 500 (77 К) 139 000 (4,2 К)	1000 13 700 (77 К) 57 900 (4,2 К)	3,0	250	24	16,5	5,4	138	27 ($\parallel$) 19,6 ($\perp$)	32 ($\parallel$) 17,1 ($\perp$)
PbTe	1730 31 600 (77 К) 800 000 (4,2 К)	840 21 600 (77 К) 250 000 (4,2 К)	1,5	400 1000 (77 К) 3000 (4,2 К)	33	13,6	3,9	125	60 ($\parallel$) 16 ($\perp$)	58 ($\parallel$) 19 ($\perp$)

* $\parallel$ ($\perp$) — магнитное поле параллельно (перпендикулярно) большой оси эллипсоида энергий.

Таблица 22.23. **Полупроводниковые соединения $A^{IV}B^{VI}$**

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, b, c, нм	ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	T_D, К	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К [294]
Si_2Te_3	Гекс., C_{3v}^4	0,743 (a); 1,347 (c) [288]	4,5 [288]	1165 [288]	—	—
GeS	Орторомб., D_{2h}^{16}	1,044 (a); 0,365 (b); 0,430 (c) [1]	4,01 [114]	895 [35] 938 [294]	—	—(6 ÷ 8)
GeSe	То же	1,079 (a); 0,382 (b); 0,438 (c) [1]	5,52 [114]	943 [114]	—	—5
GeTe	Куб., O_h^5	0,602 [114]	6,19 [114]	993 [114]	166 (<1 К) [164]	—4
SnS	Орторомб., D_{2h}^{16}	1,118 (a); 0,398 (b); 0,433 (c) [1]	5,08 [114]	1155 [216]	270 (80 К) [114]	—
SnSe	То же	1,157 (a); 0,419 (b); 0,446 (c) [1]	6,18 [114]	1133 [216]	210 (80 К) [114]	—
SnTe	Куб., O_h^5	0,628 [1] 0,632 [294]	6,45 [114]	1079 [114]	140 [114]	—
SnO_2	Тетр., D_{4h}^{14}	0,472 (a); 0,317 (c) [1]	6,95 [216]	1400 [216]	570 [294]	12
SnS_2	Триг., D_{3d}^3	0,364 (a); 0,587 (c) [1]	4,5 [216]	1038 [294] 1143 [288]	—	—8,6
$SnSe_2$	То же	0,381 (a); 0,614 (c) [288]	6,01 [294]	923 [216]	—	—

Соединение	E_g, эВ	m_n/m_0 [294]	m_p/m_0	μ_n, см²/(В·с) [294]	μ_p, см²/(В·с)	ε_0^* [294]	ε_∞^* [294]
Si_2Te_3	1,89 [294]	5,4 ($\parallel c$)	5,4 ($\parallel c$) [294]	—	$2 \cdot 10^{-3}$ ($\parallel c$) [294]	—	—
GeS	1,65 1,74 (4,2 K) [294]	—	0,3—0,7 [294]	—	90 [294]	25—30	10—15
GeSe	1,0 [8] 1,16 [114]	—	—	—	70 ($\propto T^{-2}$) [114] 60 [8]	22—30	14—22
GeTe	0,1—0,2 [294]	—	1,15 (m_{p1}) [114] 5,0 (m_{p2})	—	150 [126]	40 [288]	36
SnS	1,07 [3]	0,45(m_{dn})	0,95 (m_{dp}) [127] 0,2 ($m_\perp$) 1,0 ($m_\parallel$)	—	90 ($\perp c$) [127] $\mu_{\parallel a} \simeq \mu_{\parallel b}$ $\mu_{\parallel a}/\mu_{\parallel c} \simeq 5{,}5$	32—48	14—16
SnSe	0,9—0,95 [288]	—	0,15 (m_{dp}) [15] 0,07 [288]	—	1000 [288]	42—62	13—17
SnTe	0,19 [294] 0,26 [114]	—	0,13 (m_{p1}) 0,09 (m_{p2}) [294] 3 (m_{dp1})	—	1700 (μ_1) [181] 50 (μ_2) [114] 3500 (100 K) [114]	1770 1200	—
SnO_2	3,54 [288] 3,97 [98]	0,30($m_\perp$) 0,23 ($m_\parallel$) 0,22(m_{dn})[69]	—	260 8800 (77 K)	300 [69]	9,6—13,5	3,8—4,2
SnS_2	2,07 [183]	—	—	50	—	6—20	5,6—8,8
$SnSe_2$	0,97 [183]	0,4 2,9(m_{dn})	—	27 [183] 66 (77 K)	—	10—21	9,4—10,7

* Значения ε_0 и ε_∞ зависят от взаимной ориентации E и оси c.

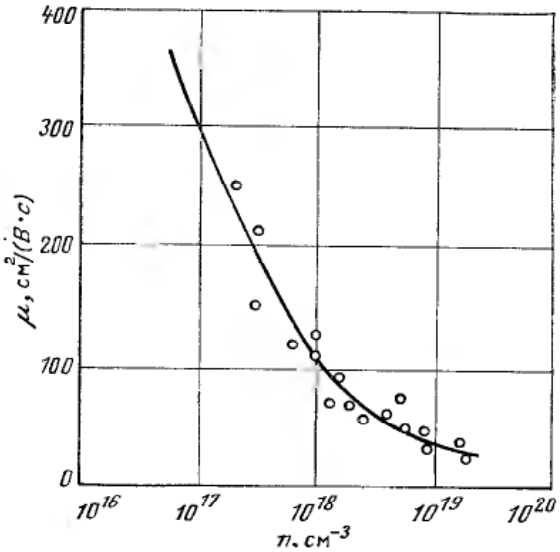


Рис. 22.179. Зависимость дрейфовой подвижности электронов в α-SiC при $T=300$ К от концентрации электронов [295]

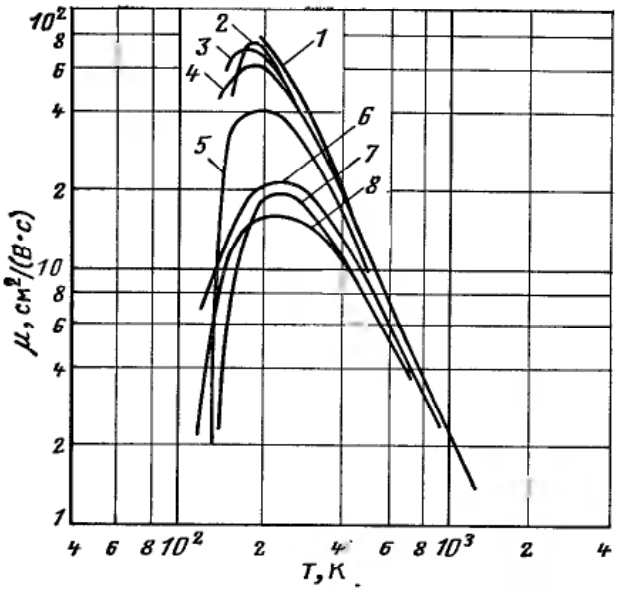


Рис. 22.180. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок в кристаллах α-SiC [296]:

№ п/п.	N_A, 10^{17} см$^{-3}$	N_D, 10^{17} см$^{-3}$	Примечание
1	3,2	1,1	Атмосфера Ar
2	3,7	1,9	То же
3	36	9	Добавка Cl к атмосфере Ar
4	23	7,6	То же
5	850	140	» »
6	340	230	Добавка CO к атмосфере Ar
7	3600	120	Добавка Cl к атмосфере Ar
8	320	190	Атмосфера Ar

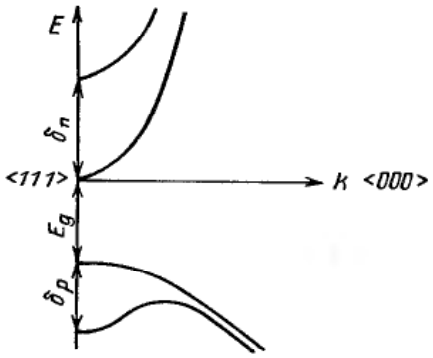


Рис. 22.181. Зонная структура PbS, PbSe, PbTe [125] (значения параметров см. в табл. 22.22)

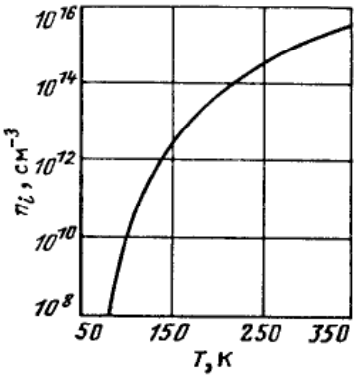


Рис. 22.183. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в PbS [297]

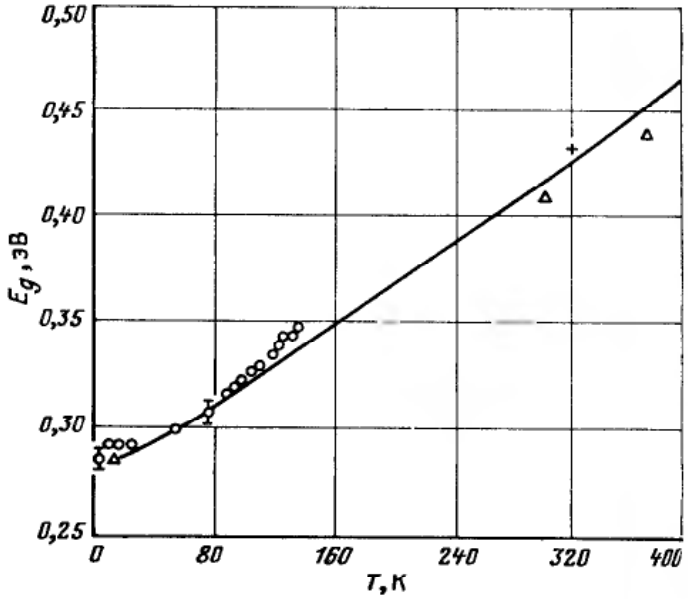
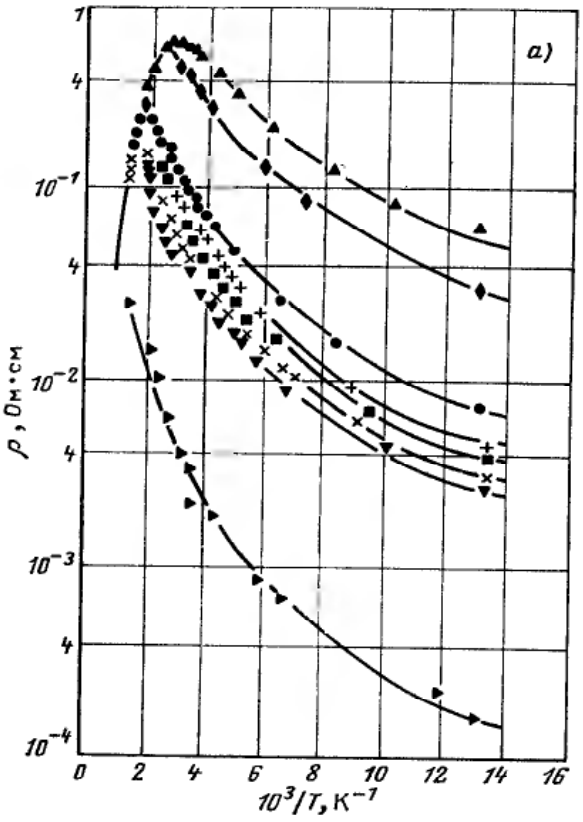


Рис. 22.182. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны PbS [297]



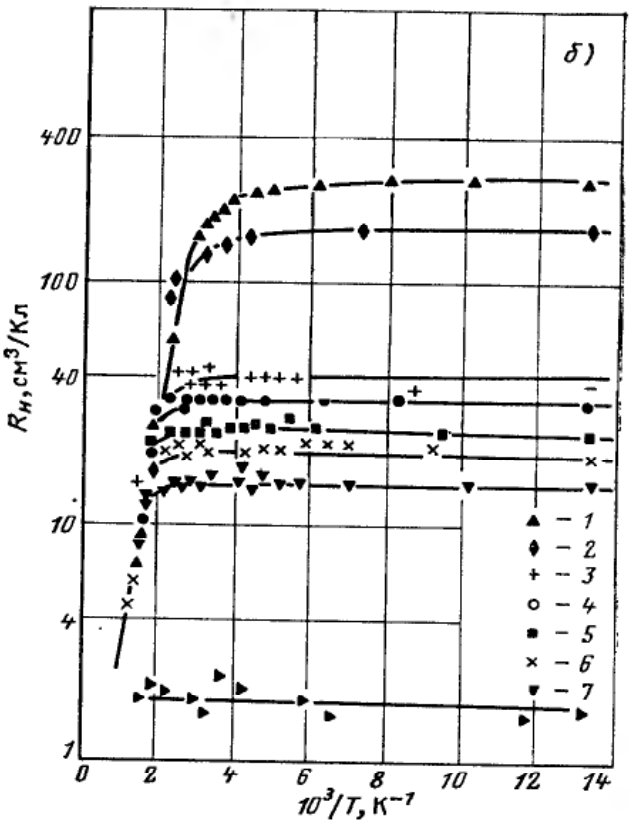


Рис. 22.184. Температурные зависимости удельного сопротивления (*а*) и коэффициента Холла (*б*) кристаллов *n*-PbS [117]:
концентрация носителей растет от *1* к *7*

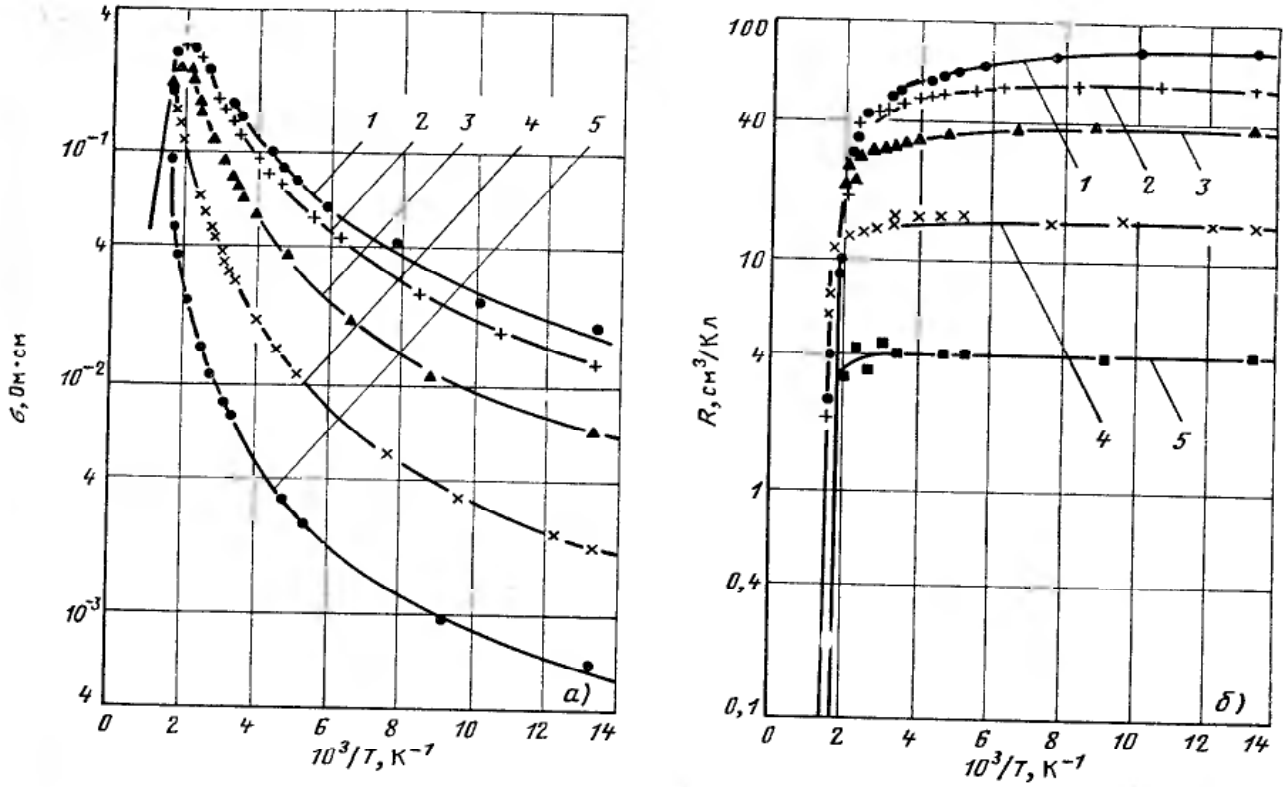


Рис. 22.185. Температурные зависимости удельного сопротивления (*а*) и коэффициента Холла (*б*) кристаллов p-PbS [228]:
концентрация растет от *1* к *5*

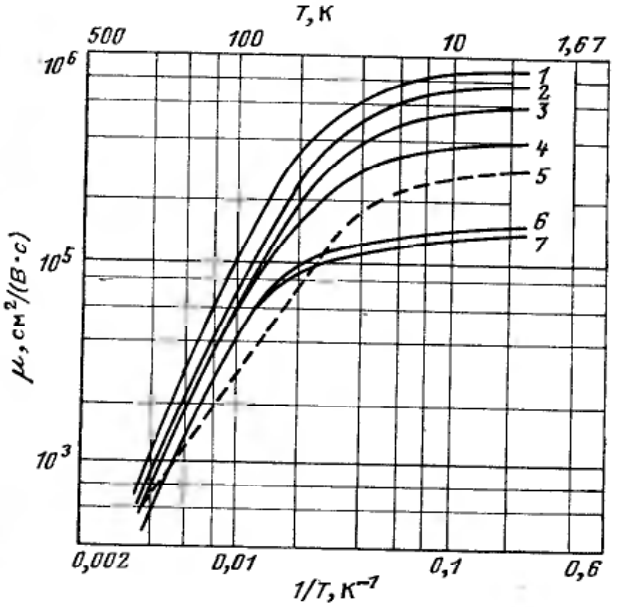


Рис. 22.186. Температурные зависимости холловских подвижностей электронов и дырок в кристаллах PbS [117]:
концентрация носителей, 10^{18} см$^{-3}$: *1* — 2,66 (*p*); *2* — 4,25 (*n*); *3* — 7,45 (*n*); *4* — 4.63 (*n*); *5* — 2,72 (*n*); *6* — 0.184 (*n*); 7—0,164 (*n*)

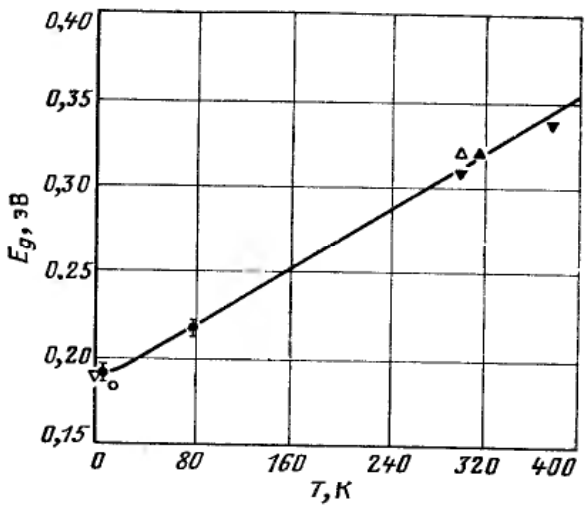


Рис. 22.187. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны PbSe [297]

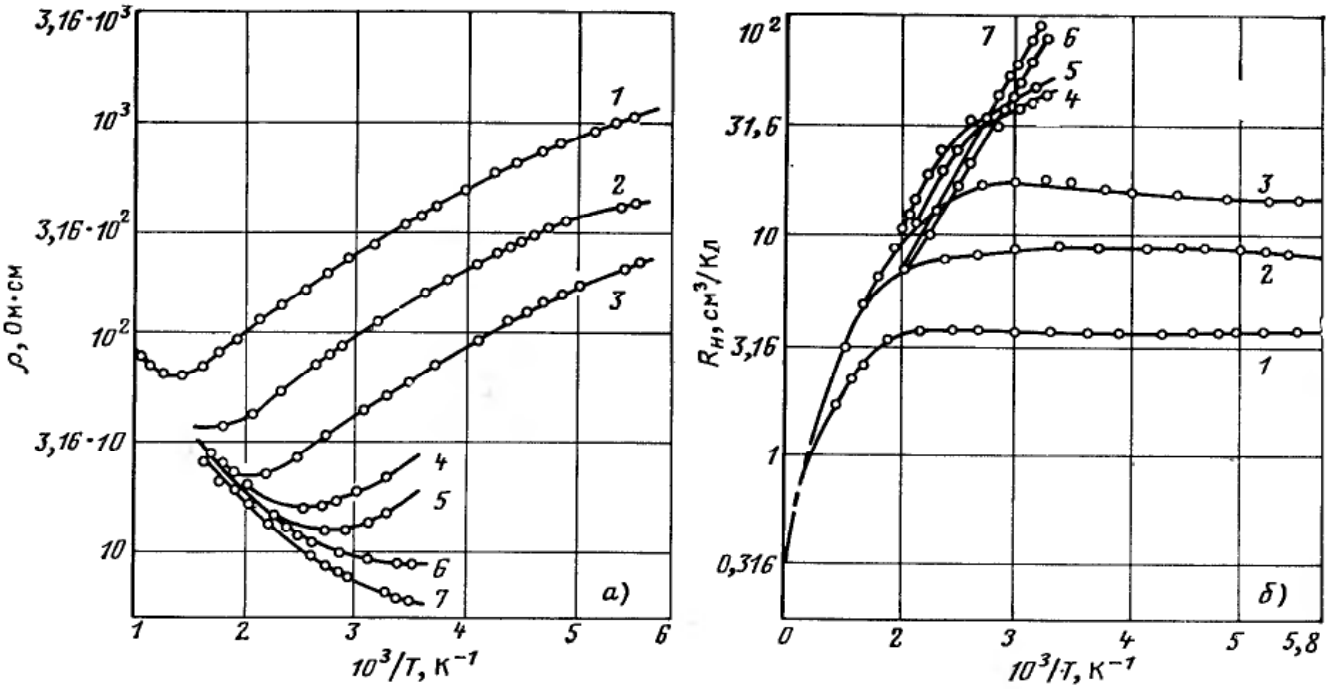


Рис. 22.189. Температурные зависимости проводимости (*а*) и коэффициента Холла (*б*) кристаллов *n*-PbSe с различной концентрацией доноров [117]:
концентрация доноров, см$^{-3}$: *1* — 1,6·10^{18}; *2* — 7,8·10^{17}; *3* —3,5·10^{17}; *4* — 1,58·10^{17}; *5* — 1,26 · 10^{17}; *6* — 4,9 · 10^{16}; *7* — 3 · 10^{6}

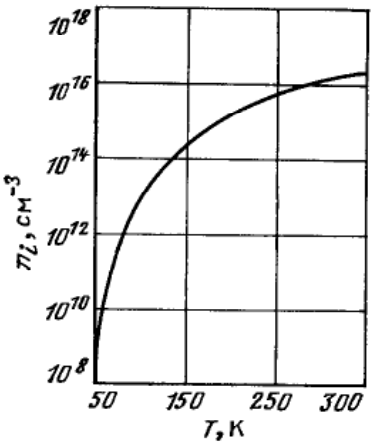


Рис. 22.188. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в PbSe [297]

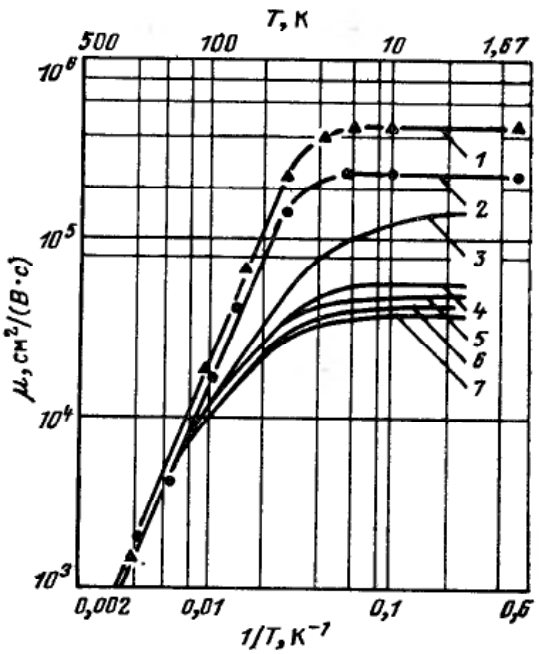


Рис. 22.190. Температуриая зависимость холловской подвижности электронов и дырок в кристаллах PbSe [117]:
концентрация носителей, 10^{18} см$^{-3}$: *1* — 0,16 (*n*); *2* — 0,11 (*p*); *3* — 3,6 (*n*); *4* — 4,3 (*p*); *5* — 1,4 (*p*); *6* — 3,5 (*p*); *7* — 2,4 (*n*)

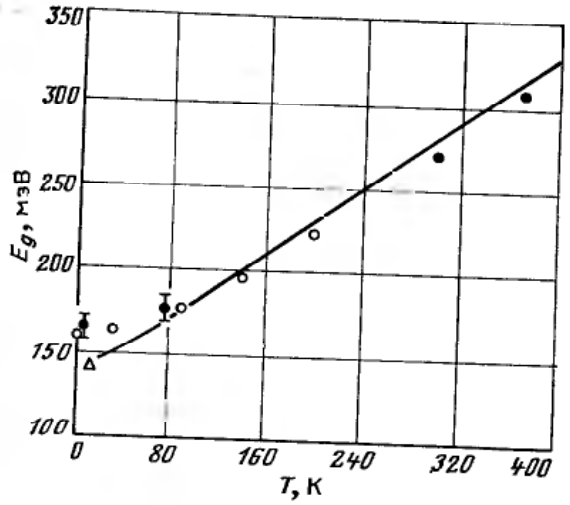


Рис. 22.191. Температурная зависимость ширины запрещенной зоны PbTe [297]

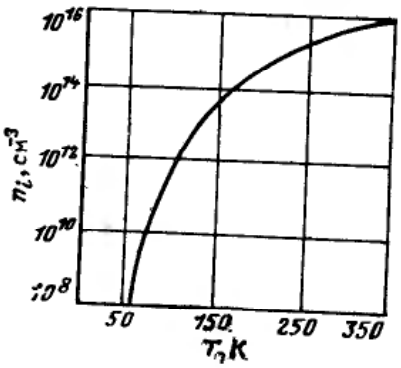
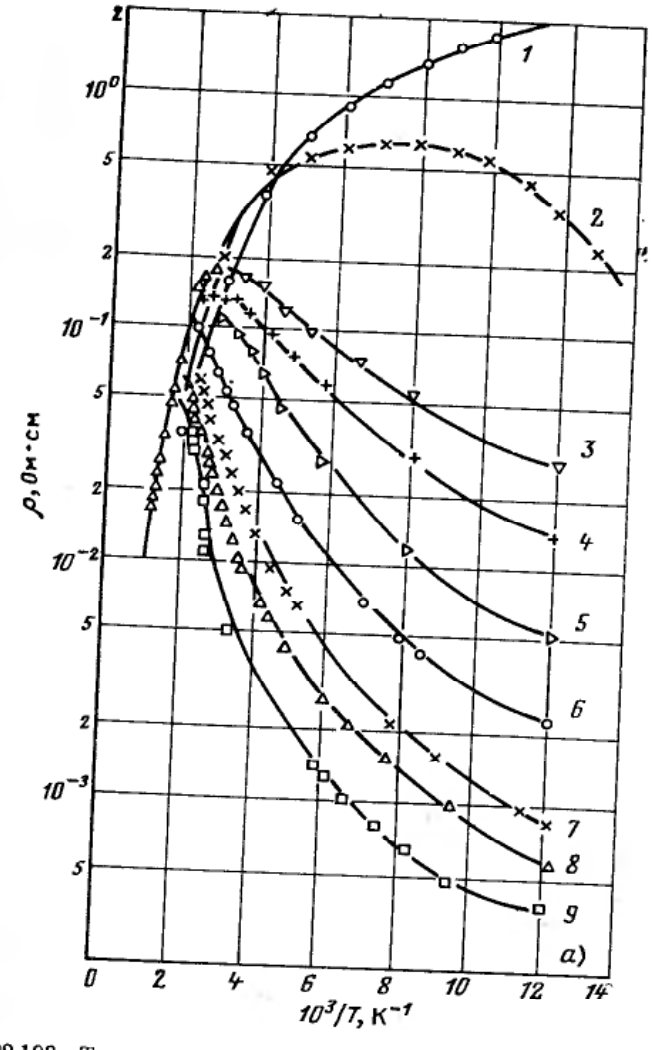


Рис. 22.192. Температурная зависимость собственной концентрации носителей в PbTe [297]



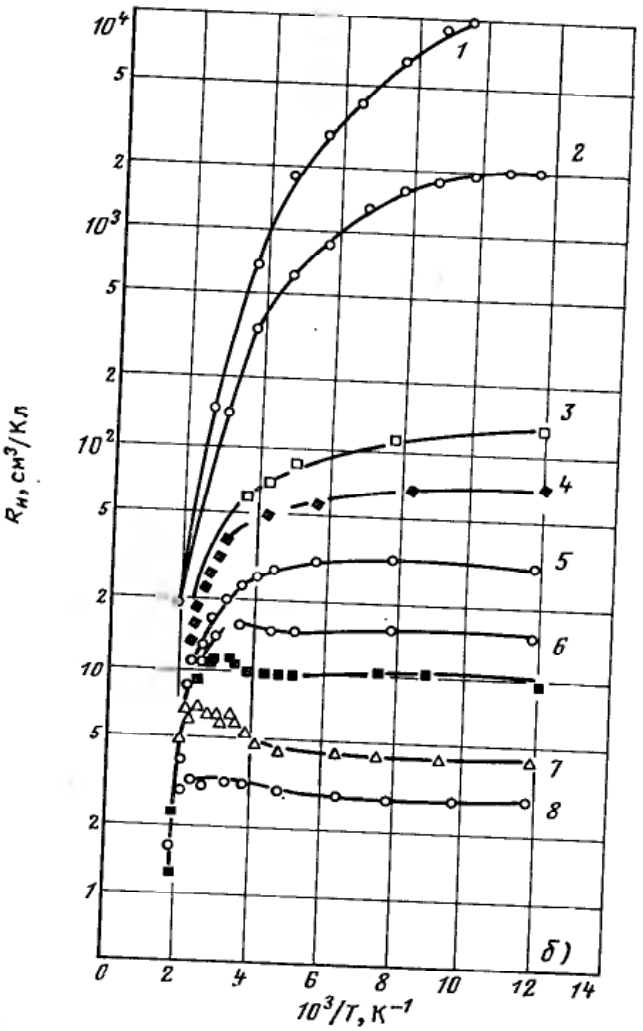


Рис. 22.193. Температурные зависимости удельного сопротивления (*а*) и коэффициента Холла (*б*) различных кристаллов PbTe [117]:

1, 2 — почти собственные образцы; *3—9* — *p*-PbTe; концентрация носителей растет от *1* к *9*

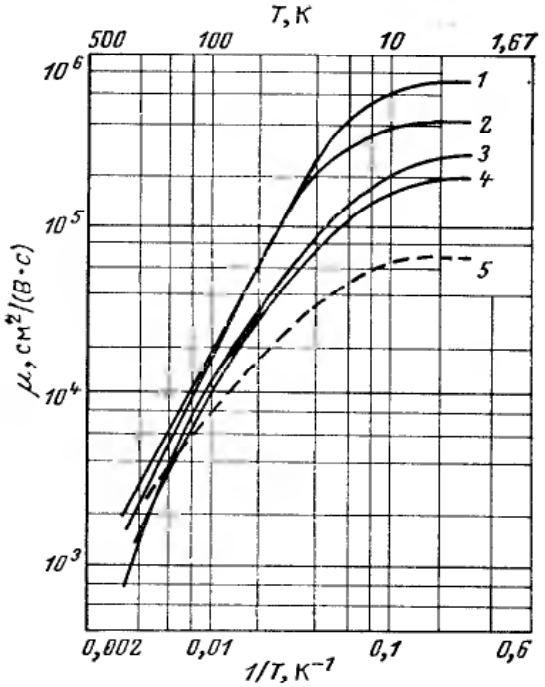


Рис. 22.194. Температурные зависимости холловских подвижностей электронов и дырок в кристаллах PbTe с различной концентрацией носителей, 10^{18} см$^{-3}$:
1 — 1,0 (*n*); *2* — 0,58 (*n*); *3* — 2,1 (*p*); *4* — 3,0 (*p*); *5* — 9,5 (*n*) [117]

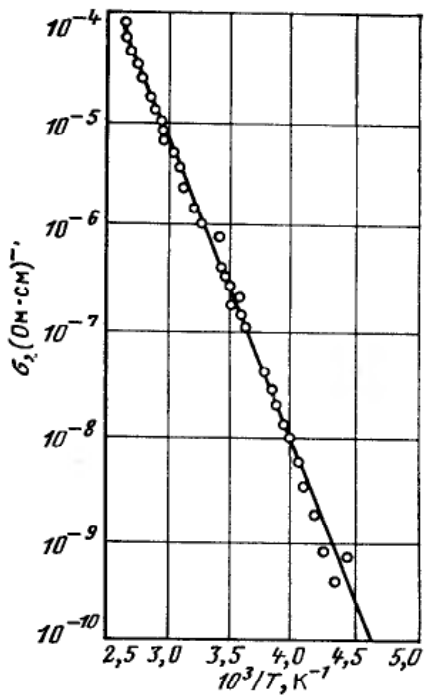


Рис. 22.196. Температурная зависимость проводимости иглообразных кристаллов *p*-GeS [298]

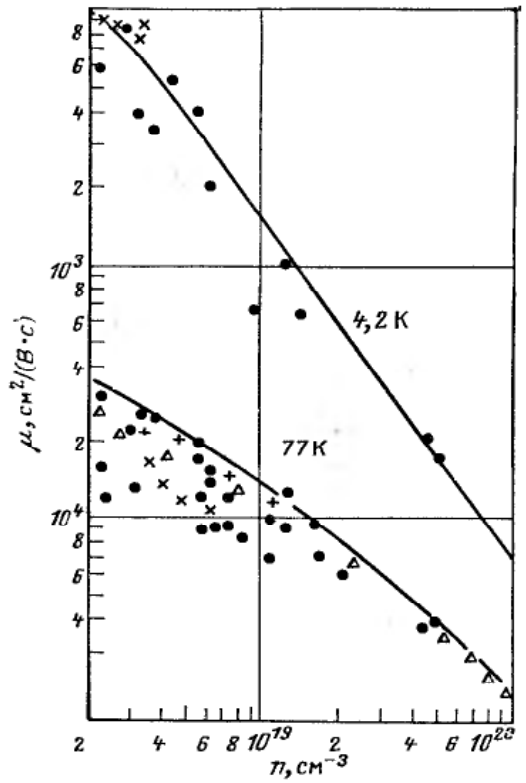


Рис. 22.195. Зависимости подвижности электронов в PbTe при $T=77$ и 4,2 К от их концентрации [125]:
точки — данные разных авторов

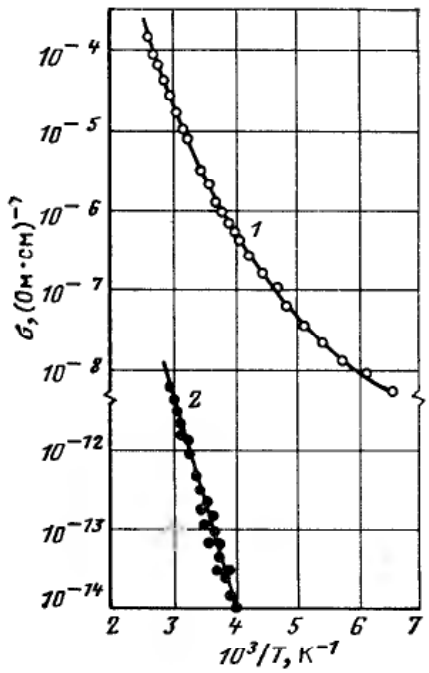


Рис. 22.197. Температурные зависимости проводимости кристаллического (1, поперек оси *c*) и аморфного (2) GeS [299]

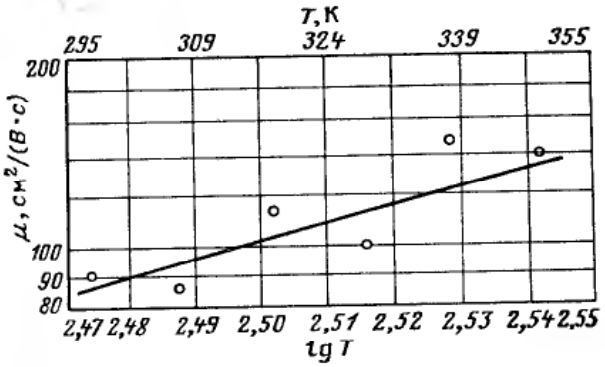


Рис. 22.198. Температурная зависимость подвижности дырок для пленки GeS толщиной 730 нм [300]

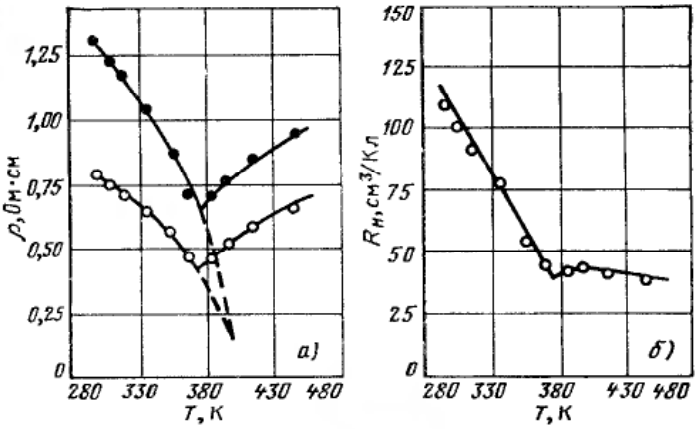


Рис. 22.200. Температурные зависимости удельного сопротивления (*а*) вдоль осей *a* (●) и *b* (○) и коэффициента Холла (*б*) в плоскости (001) для GeSe [302]

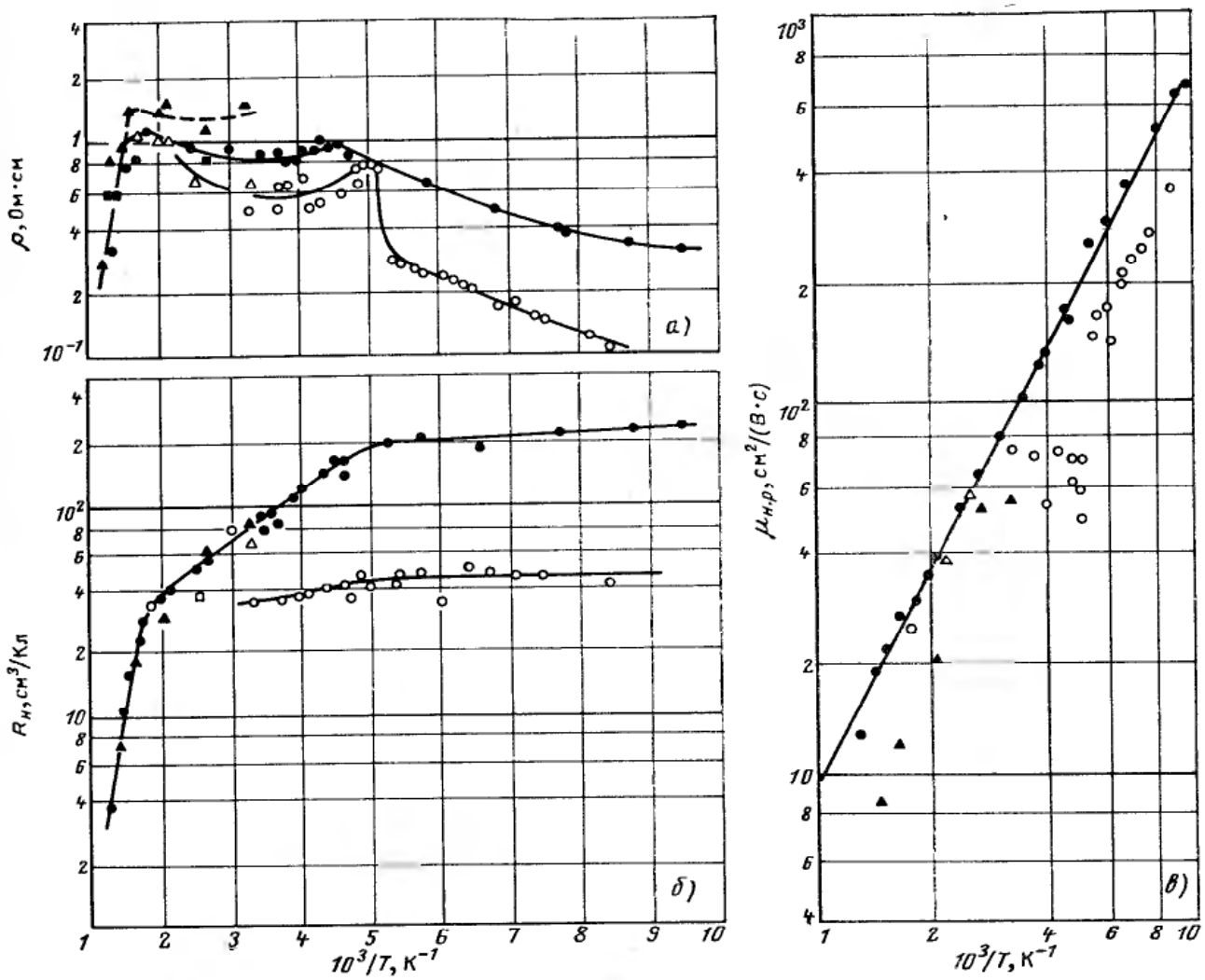


Рис. 22.199. Температурные зависимости удельного сопротивления (*а*), коэффициента Холла (*б*) и подвижности дырок (*в*) поперек оси *c* для различных кристаллов *p*-GeSe стехиометрического состава [301]

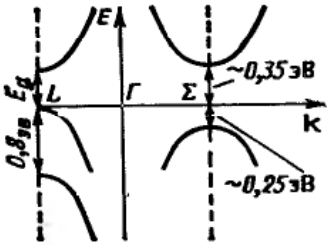


Рис. 22.201. Зонная структура GeTe [294]

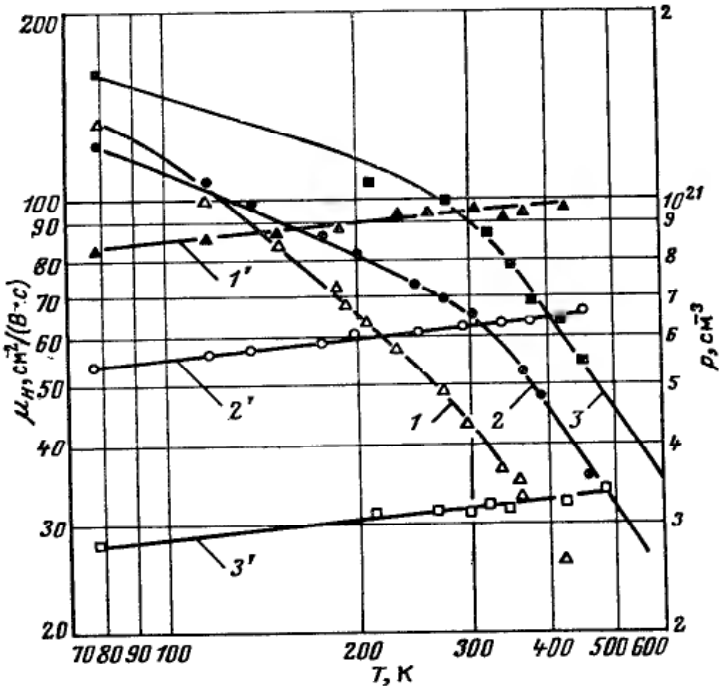


Рис. 22.203. Температурные зависимости холловской подвижности (*2*, *3*) и концентрации дырок (*2'*, *3'*) в поликристаллических образцах и монокристаллических пленках (*1*, *1'*) GeTe [304]:
температура осаждения пленок на стеклянной подложке, °С: *2*, *2'* — 250; *3*, *3'* — 300

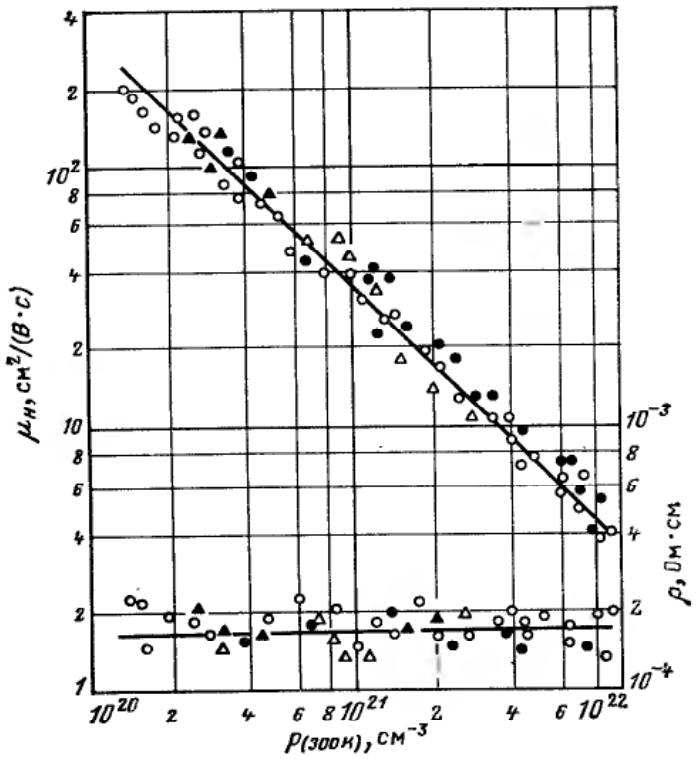


Рис. 22.202. Зависимости холловской подвижности дырок и удельного сопротивления от концентрации дырок в пленках GeTe с различным содержанием Te:
○ — 54% (неотожженный образец); остальные символы — 51,5% (после нескольких процессов отжига) [303]

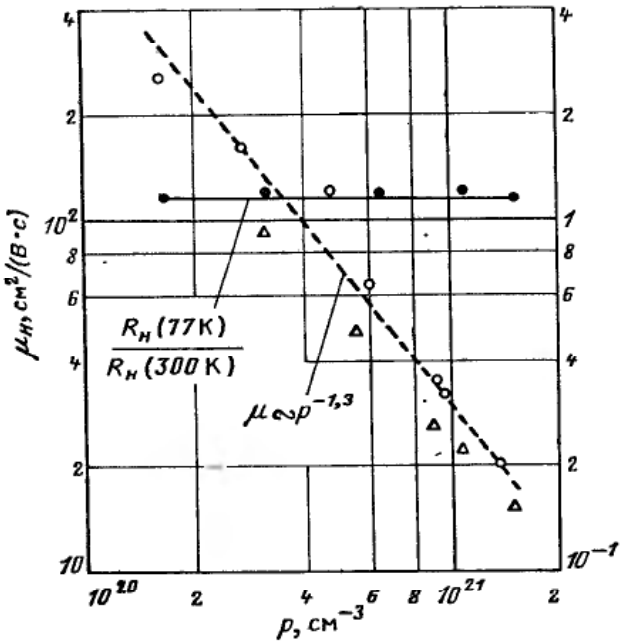


Рис. 22.204. Зависимости холловской подвижности дырок при температурах 77 (○) и 300 К (△) и отношения коэффициентов Холла для тех же температур от концентрации дырок в кристаллических плеиках GeTe, полученных осаждением на подложках с различной температурой [304]. Значения $R_н$ (300 К) для различных пленок различаются; для объемных поликристаллических образцов $R_н$ (300 К) = $6{,}5 \cdot 10^{-3}$ см³/Кл

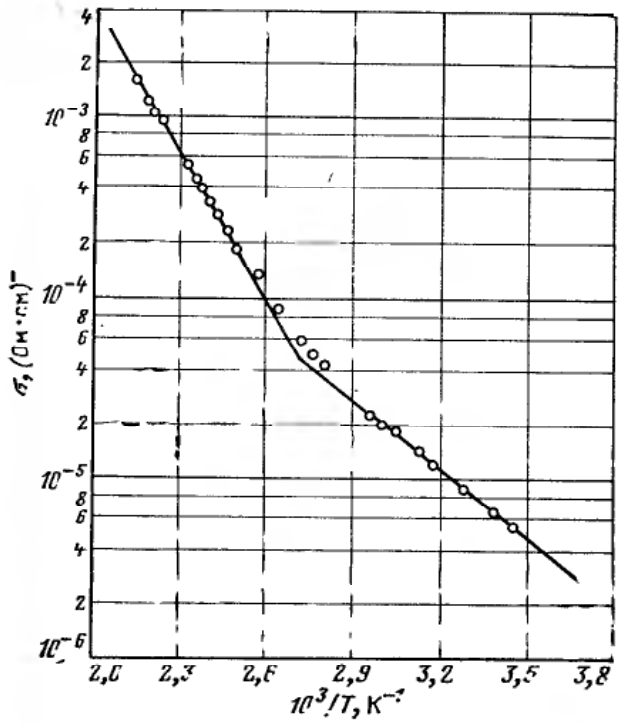


Рис. 22.205. Температурная зависимость проводимости монокристалла SnS [305]

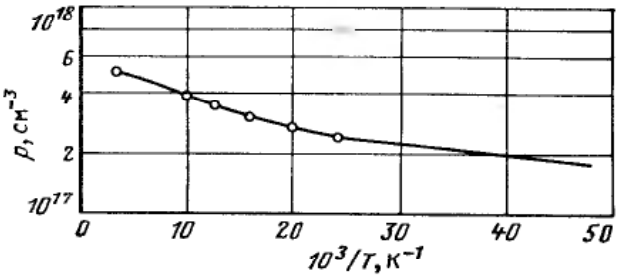


Рис. 22.207. Температурная зависимость концентрации дырок в SnS [306]

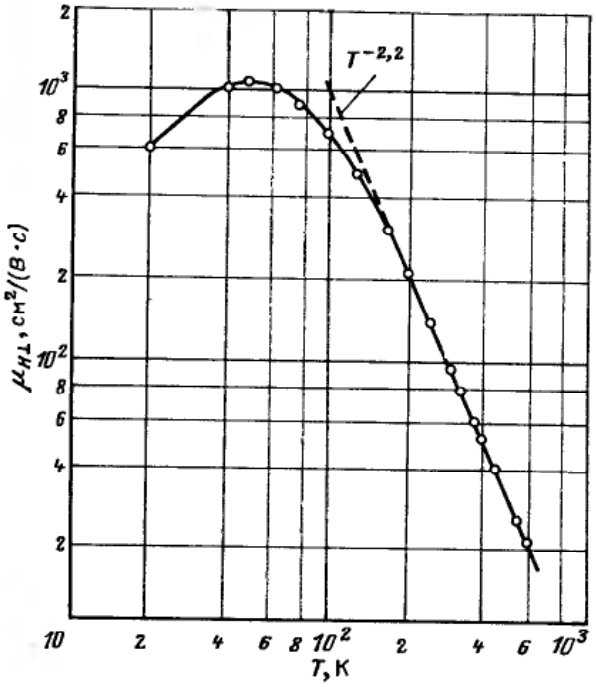


Рис. 22.206. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в SnS поперек оси *c* [306]

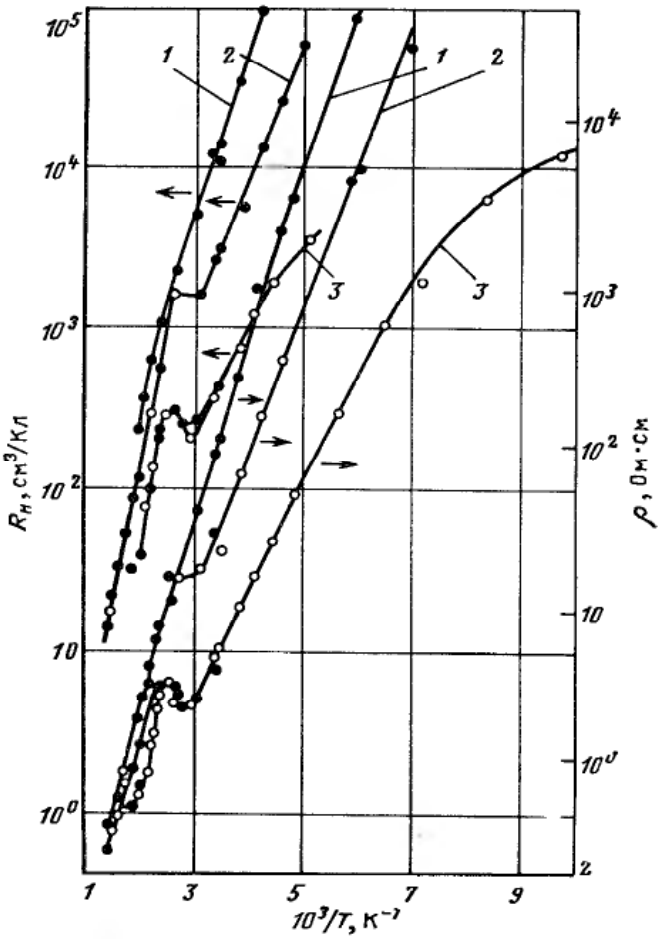


Рис. 22.208. Температурные зависимости удельного сопротивления и коэффициента Холла в кристаллах *n*-SnSe после выращивания (*1*), отжига (*2*) и закалки (*3*) [307]

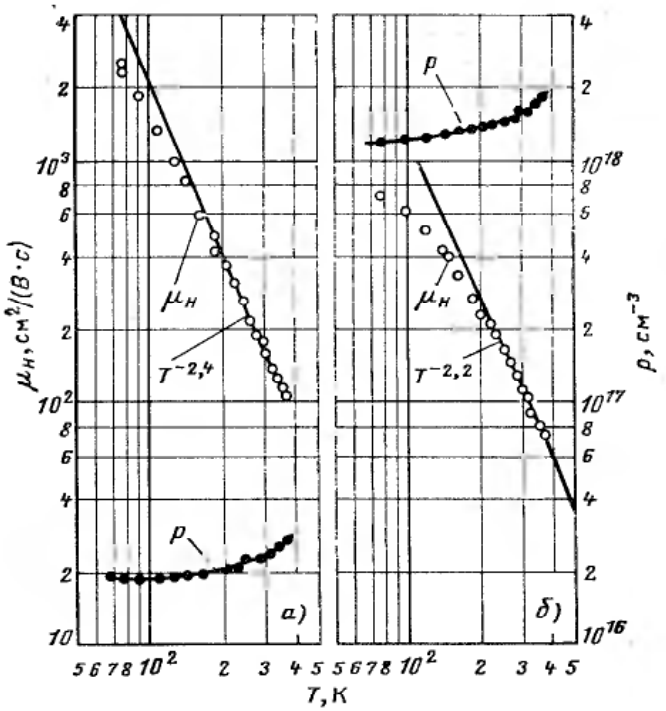


Рис. 22.209. Температурные зависимости подвижности дырок вдоль оси [001] и концентрации дырок в кристаллах SnSe с низкой (*а*) и высокой (*б*) концентрацией дырок [308]

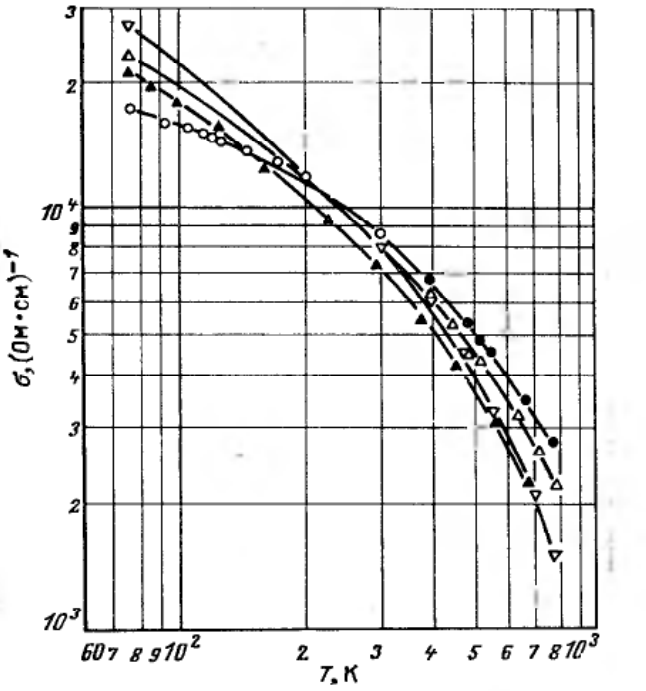


Рис. 22.212. Температурная зависимость проводимости различных кристаллов SnTe [309]:
концентрация дырок при T=77 К, 10^{20} см$^{-3}$: ▽ — 2,5; ▲ — 3,48; △ — 8,05; ○ — 18,8; ● — 17,6

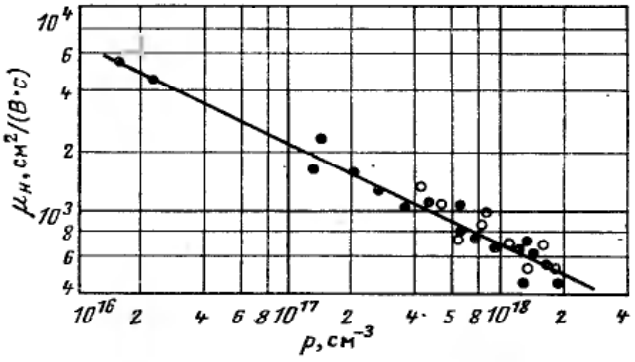


Рис. 22.210. Зависимость холловской подвижности дырок вдоль оси [001] при T=77 К от их концентрации в SnSe после выращивания (○) и отжига (●) [308]

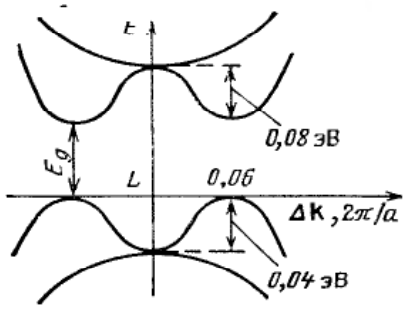


Рис. 22.211. Зонная структура SnTe вблизи точки L зоны Бриллюэна [294]

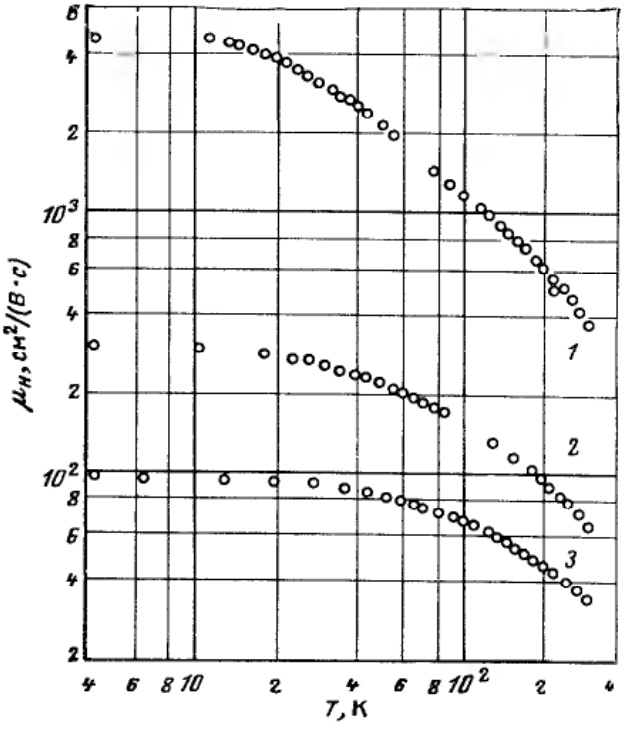


Рис. 22.213. Температурная зависимость холловской подвижности дырок в различных кристаллах SnTe [310]:
концентрация дырок при T=4,2 К, 10^{20} см$^{-3}$: *1*—1,4; *2*—7,73; *3* — 1,74

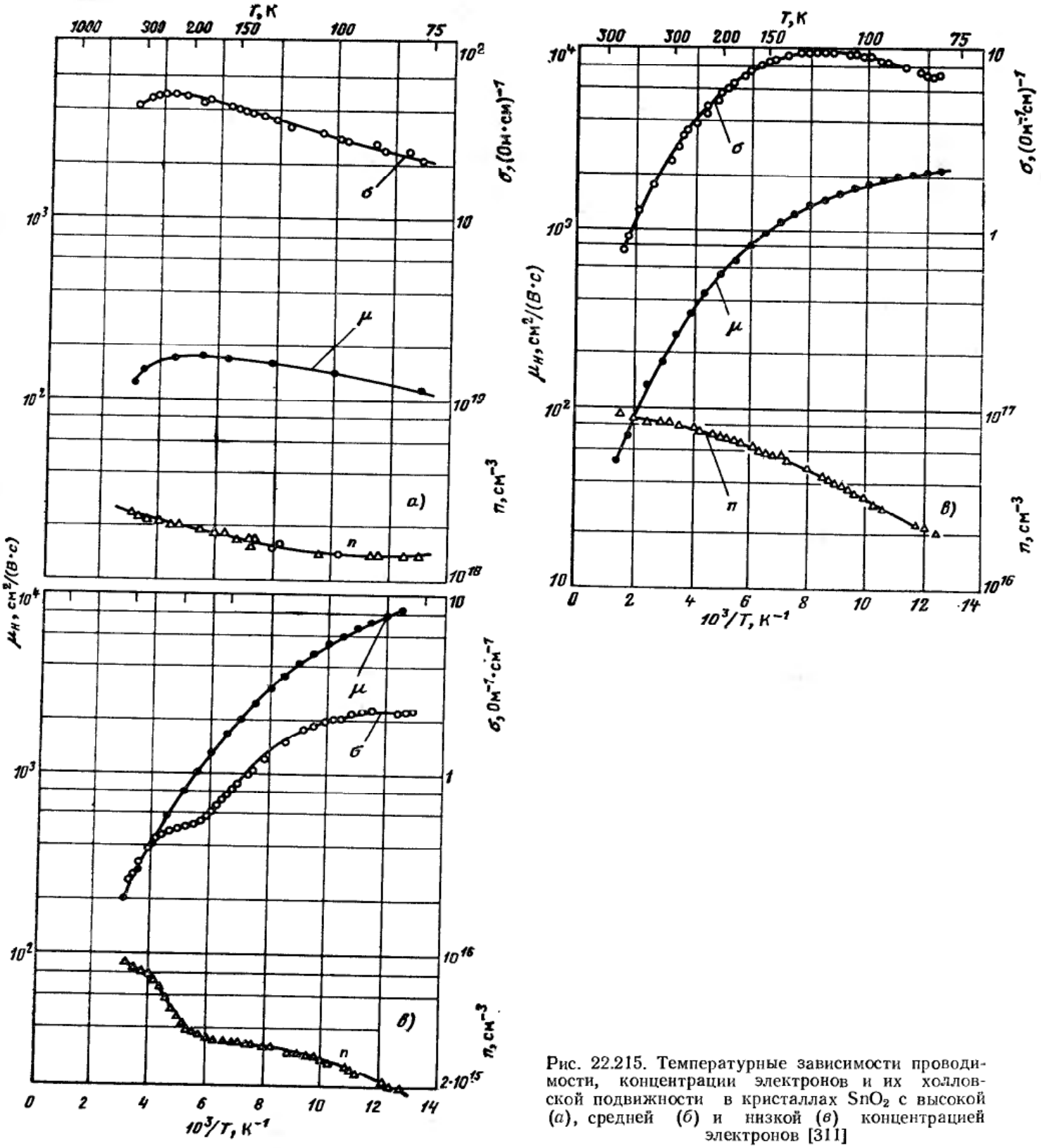


Рис. 22.215. Температурные зависимости проводимости, концентрации электронов и их холловской подвижности в кристаллах SnO_2 с высокой (*а*), средней (*б*) и низкой (*в*) концентрацией электронов [311]

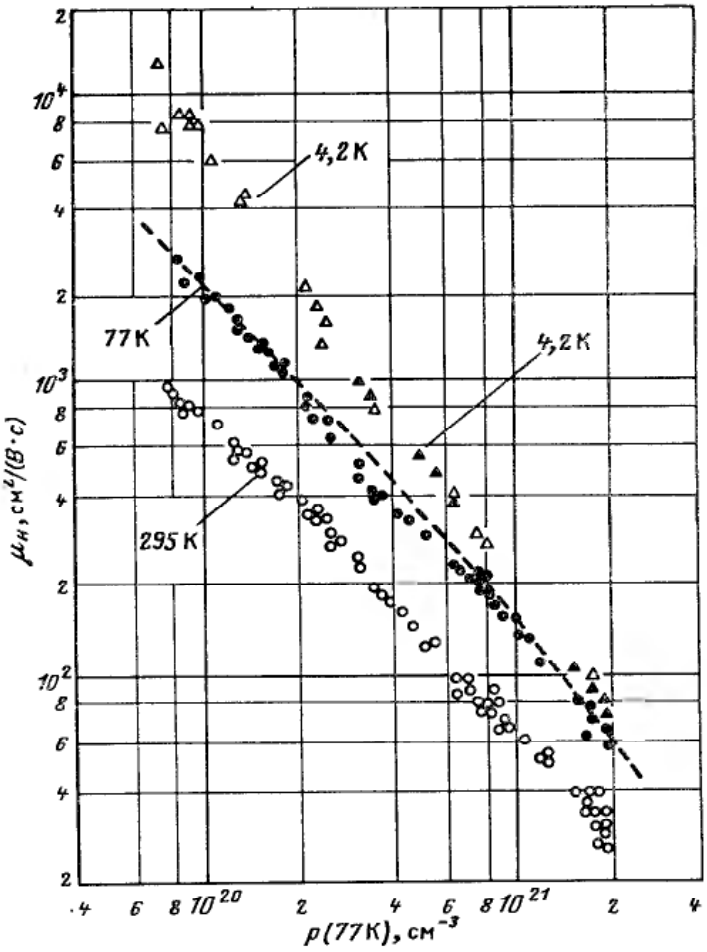


Рис. 22.214. Зависимость холловской подвижности дырок при различной температуре от их концентрации при $T=77$ К для кристаллов SnTe [309, 310]

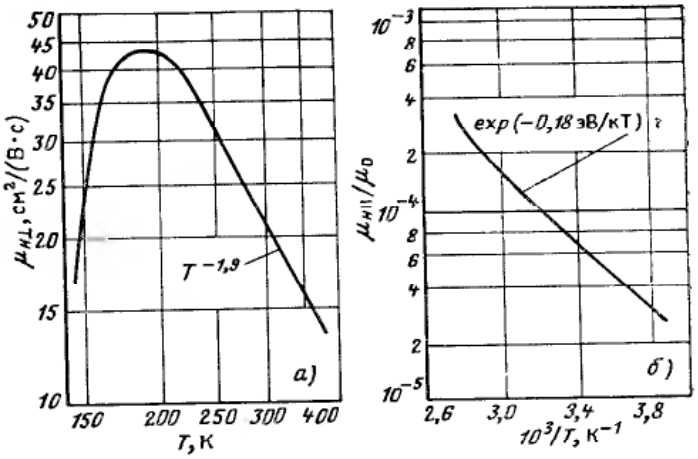


Рис. 22.217. Температурная зависимость холловской подвижности электронов поперек (*а*) и вдоль (*б*) оси *c* в SnS_2 [312]

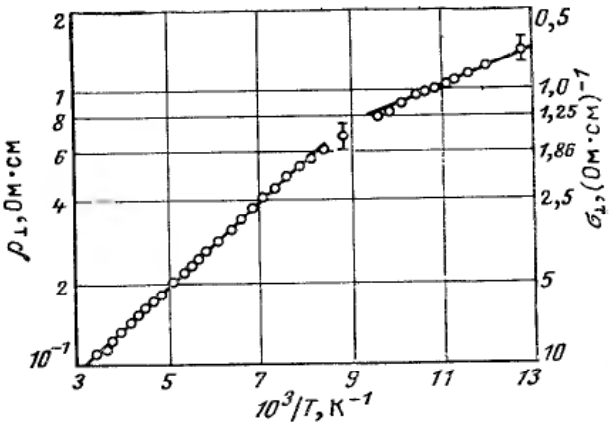


Рис. 22.218. Температурная зависимость удельного сопротивления (проводимости) поперек оси *c* для кристалла $SnSe_2$ с концентрацией электронов $n=1{,}57\cdot10^{18}$ см$^{-3}$ при $T=290$ К [36]

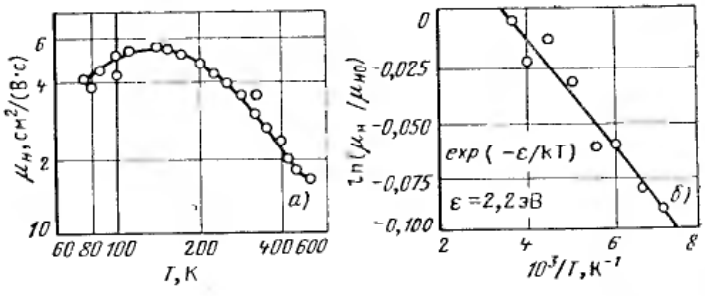


Рис. 22.219. Температурные зависимости подвижности электронов в базисной плоскости (*а*) и перпендикулярном ей направлении (*б*) в кристалле $SnSe_2$ [270]

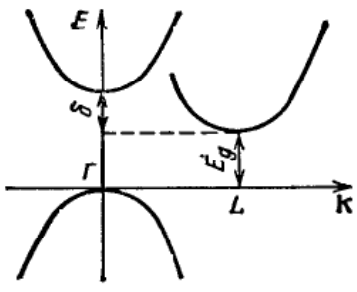


Рис. 22.216. Зонная структура SnS_2, $SnSe_2$ [294]:
δ, эВ: SnS_2 — 0,8; $SnSe_2$ — 0.65

22.3.5. Соединения типа $A^{V}B^{V}$—$A^{V}B^{VII}$

Известно полупроводниковое соединение SbI типа $A^{V}B^{VII}$, кристаллизующееся в гексагональной решетке ($a=0{,}748$ нм, $c=2{,}09$ нм, $E_g=2{,}5$ эВ [242]).

Таблица 22.24. **Электрофизические свойства сплавов $Bi_{1-x}Sb_x$ [293]**

Кристаллическая структура		T_D, К	E_g, эВ	m_n/m_0	μ_n, см²/(В·с)	μ_p, см²/(В·с)	ε_0, (4,2 К)
Система	a, b, c, нм						
Ромбоэдр.	0,474—0,450 (a, $x = 0 \div 1$); 1,186 — 1,154 (c, $x = 0 \div 0{,}5$)	128,5 ($x = 0{,}1$)	$6 \cdot 10^{-3}$ ($x = 0{,}06$) $8 \cdot 10^{-3}$ ($x = 0{,}068$)	0,025 (m_1, $x = 0{,}05$) 0,75 (m_2, $x = 0{,}05$) 0,0065 (m_3, $x = 0{,}05$)	$3{,}97 \cdot 10^4$ ($x = 0{,}03$)	$4{,}73 \cdot 10^4$ ($x = 0{,}03$)	360 ($x = 0{,}072$) 175 ($x = 0{,}092$)

Таблица 22.25. **Полупроводниковые соединения $A^V B^{VI}$**

Соединение	Кристаллическая структура		ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	$\partial E_g/\partial T$, 10^{-4} эВ/К	m_n/m_0
	Система, группа	a, b, c, нм					
As_2S_3	Моноклин., C_{2h}^5	1,147 (a); 0,957 (b); 0,424 (c) [1]	3,43 [123]	598 [123]	2,5 [123] 2,6 [294]	—5,6 [10] —7 [294]	—
As_2Se_3	То же	1,205 (a); 0,989 (b); 0,428 (c) [288]	4,75 [216]	633 [216]	1,8 [114] 1,85 [294] 1,9 [107]	—8 [288]	—
As_2Te_3	» »	1,44 (a); 0,992 (b); 0,405 (c) [1]	6,1 [123]	635 [116]	0,5 [288] 1,0 [123]	—3 [288]	0,36 (m_{dn}) [15]
Sb_2S_3	Орторомб., D_{2h}^{16}	1,12 (a); 1,128 (b); 0,386 (c) [1]	4,64 [123]	819 [116]	1,62 [12] 1,72 [114] 1,88 [294]	—5,7 [114] —9 [294]	—
Sb_2Se_3	То же	1,158 (a); 1,168 (b); 0,398 (c) [1]	5,81 [123]	885 [116]	1,1 [294] 1,2 [123]	—5,5 [294] —7 [114]	2,2 [288]
Sb_2Te_3	Триг., D_{3d}^5	1,043 (a); $\alpha = 23°23'$ [294]	6,5 [198] 6,57 [114]	895 [118]	0,19 [48] 0,22 [294]	—1 [288]	0,37 (m_{dn}) [15]
Bi_2S_3	Орторомб., D_{2h}^{16}	1,113 (a); 1,127 (b); 0,397 (c) [1]	6,73 [123] 6,81 [294]	1036 [294] 1123 [116]	1,25 [16] 1,3 [116]	—8 [288]	—
Bi_2Se	Триг., D_{3d}^5	0,984 (a); $\alpha = 24°24'$ [132]	7,40 [114] 7,68 [294]	979 [116]	0,16 [294] 0,2 [288]	—2 [168]	0,02 ($m_\perp$) 0,13 ($m_\parallel$) [294]
Bi_2Te_3	То же	1,048 (a); $\alpha = 24°9'$ [117]	7,86 [117]	853 [116]	0,13 [117] 0,16 [45]	—0,95 [117] —1,5 [294]	0,15 (m_{dn}) 0,27 [294]
BiSe	Гекс., D_{3d}^1	0,418 (a); 2,28(c) [288]	8,4 [288]	880 [123]	0,4 [123]	—	0,32 (m_{dn})[123] —

Продолжение табл. 22.25

Соединение	m_p/m_0	μ_n, см²/(В·с)	μ_p, см²/(В·с)	ε_∞ [294]	ε_0 [294]	T_D, К
As_2S_3	—	~ 1 [294]	—	5,7—8,8 7,5 [184]	5,9—12 9,7 [184]	590 [288]
As_2Se_3	—	20—80 [294]	~10 [288]	8,8—10,5 6,0 [184]	12,4—13,9 8,9 [184]	418 [288]
As_2Te_3	0,5 (m_{dp}) [15]	170 [15]	80 [15]	—	—	260 [288]
Sb_2S_3	—	15 [115]	45 [115]	7,2 ($\perp c$) 9,5 ($\parallel c$)	180 ($\parallel c$) 15 ($\perp c$)	310 [132]
Sb_2Se_3	1,4 [288]	75 [16]	45 [16]	13,7 ($\perp c$) 15,1 ($\parallel c$)	120 ($\parallel c$)	240 [132]
Sb_2Te_3	0,3 [294] 0,34 (m_{dp}) [15]	—	400 [44]	32,5 ($\perp c$)	168 ($\perp c$)	160 [132]
Bi_2S_3	—	200 [123]	10 000 (4,2 К) [294] —	51 ($\parallel c$) 13 ($\parallel c$)	36,5 ($\parallel c$) 38 ($\perp c$)	435 [288]
Bi_2Se_3	0,12 [294]	600—2000 [114] ($\sim T^{-7/2}$)	40 [294]	9 ($\perp c$) 29 ($\perp c$)	120 ($\parallel c$) 113 ($\perp c$)	180 [132]
Bi_2Te_3	0,24 [123] 0,35 (m_{dn}) [294]	1200 [13] ($\sim T^{-1/2}$)	600 ($\sim T^{-2}$) [13]	50 ($\parallel c$)	100 [288] 360 [288]	165 [294]
BiSe	—	20 [288]	—	85 ($\perp c$) —	—	—

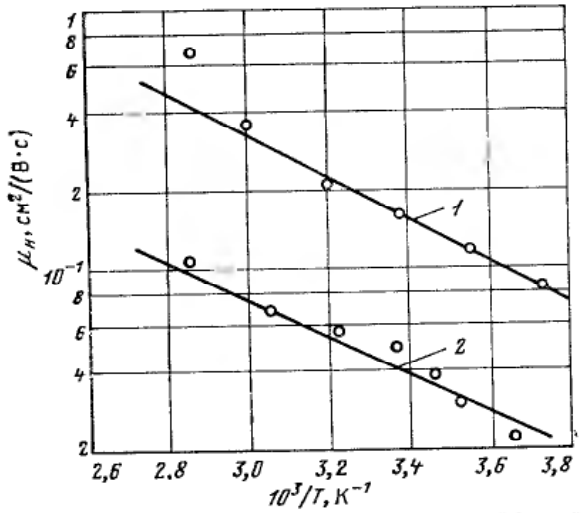


Рис. 22.220. Температурная зависимость дрейфовой подвижности дырок (поперек слоев) в двух кристаллах As_2S_3 [268]:

в кристалле *2* — бóльшая, чем в кристалле *1*, концентрация ловушек

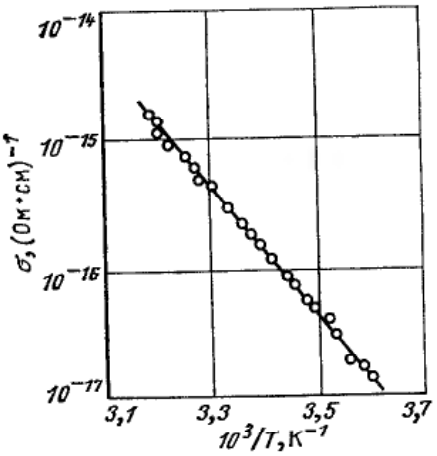


Рис. 22.221. Температурная зависимость проводимости (поперек слоев) для As_2Se_3 [261]

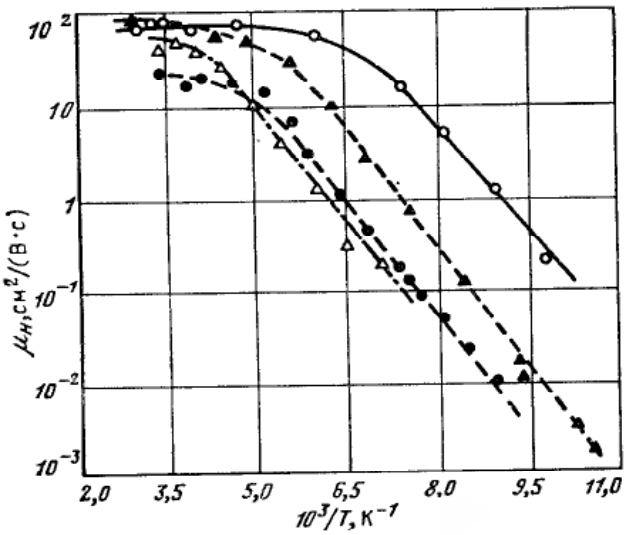


Рис. 22.222. Температурные зависимости дрейфовой подвижности электронов (поперек слоев) в различных кристаллах As_2Se_3 [261]:

отношение концентрации ловушек к эффективной плотности состояний в зоне проводимости: ○ — 10^{-5}; ▲ — $2\cdot10^{-5}$; ● — $9\cdot10^{-5}$; △ — $3\cdot10^{-4}$

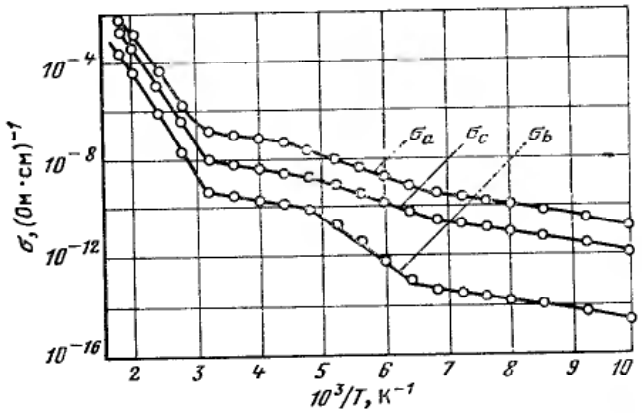


Рис. 22.223. Температурные зависимости проводимости Sb_2S_3 вдоль осей *a*, *b*, *c* [258]

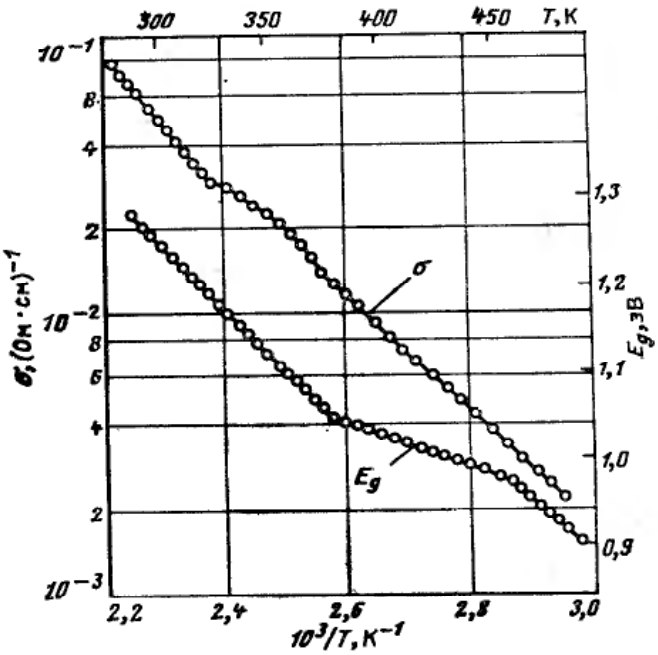


Рис. 22.224. Температурные зависимости проводимости (вдоль оси *c*) и ширины запрещенной зоны Sb_2Se_3 [248]

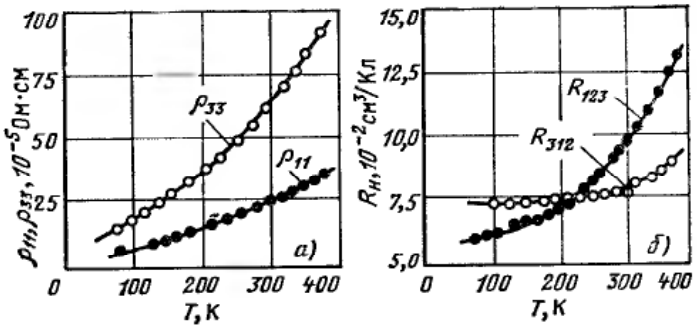


Рис. 22.225. Температурная зависимость удельного сопротивления (*а*) вдоль (ρ_{33}) и поперек (ρ_{11}) оси *c* и коэффициентов Холла (*б*) в геометрии $I \| c \perp B$ (R_{312}) и $I \perp c \| B$ (R_{123}) для Sb_2Te_3 [206]

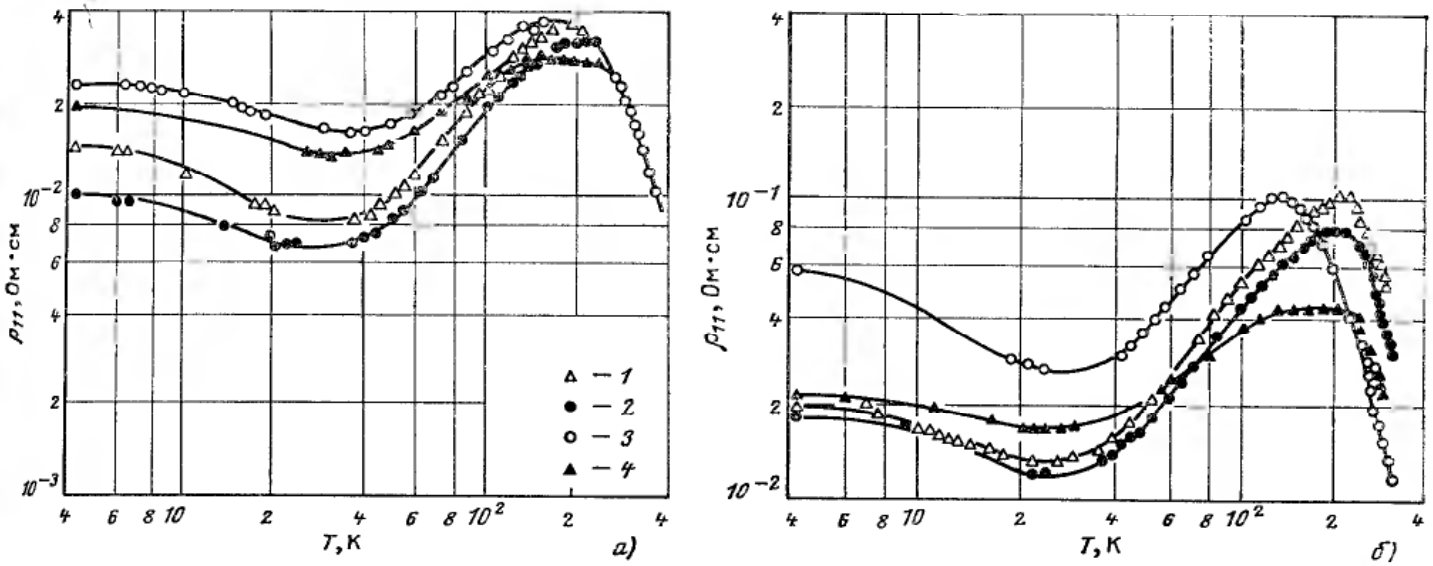


Рис. 22.226. Температурные зависимости удельного сопротивления (поперек оси c) кристаллов n-Bi_2Se_3 ($а$) и p-Bi_2Se_3 ($б$) [203]:
концентрация носителей растет от *1* к *4*

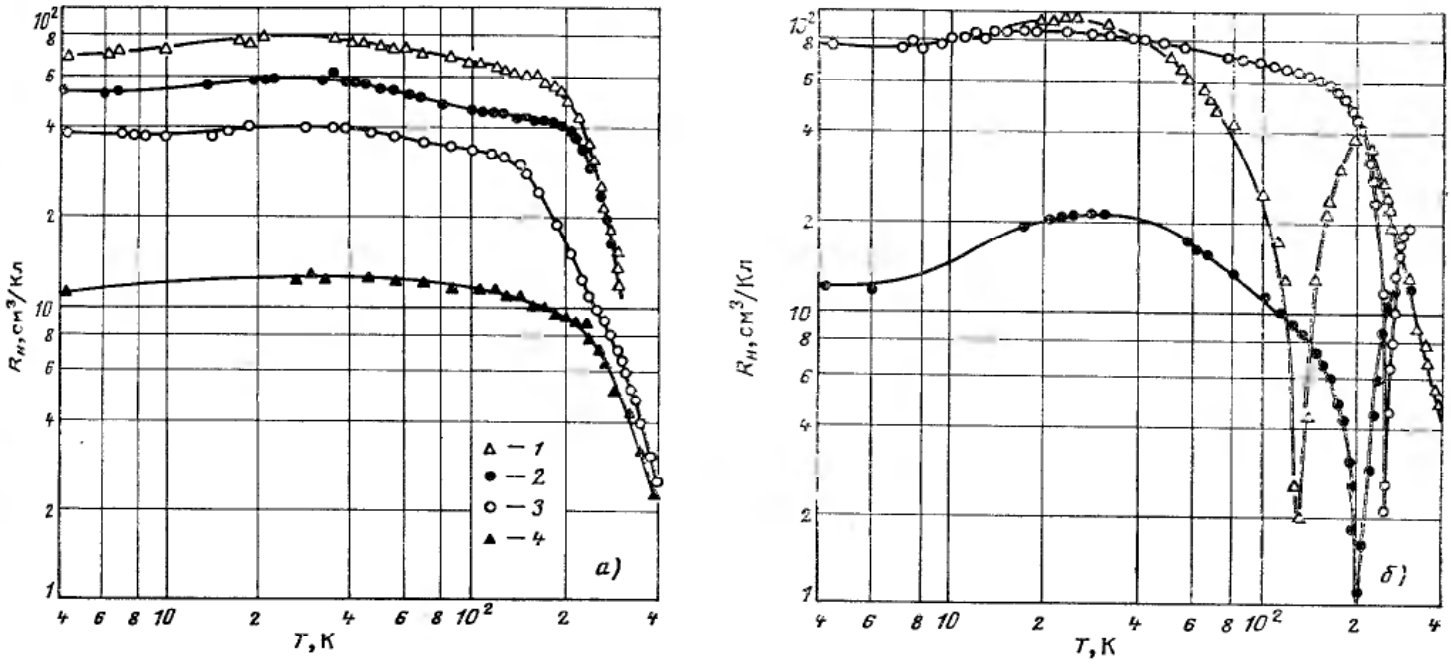


Рис. 22.227. Температурные зависимости коэффициента Холла в геометрии $I \parallel c \perp B$ для кристаллов n-Bi_2Se_3 ($а$) и p-Bi_2Se_3 ($б$) [203]:
кристаллы те же, что на рис. 22.226

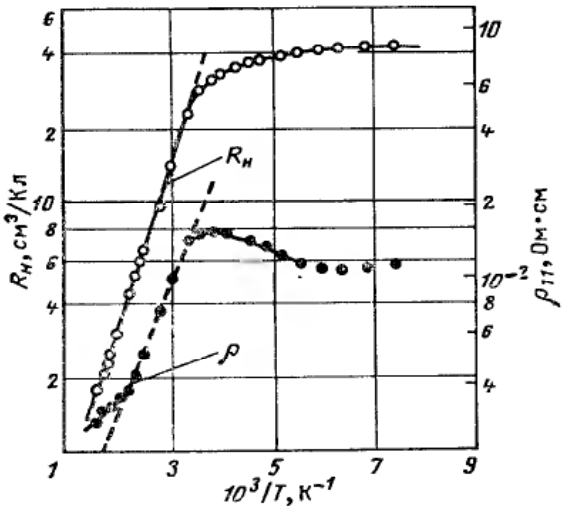


Рис. 22.228. Температурные зависимости удельного сопротивления (поперек оси c) и коэффициента Холла в геометрии $I \| c \perp B$ для n-Bi_2Se_3 в области собственной проводимости [203]

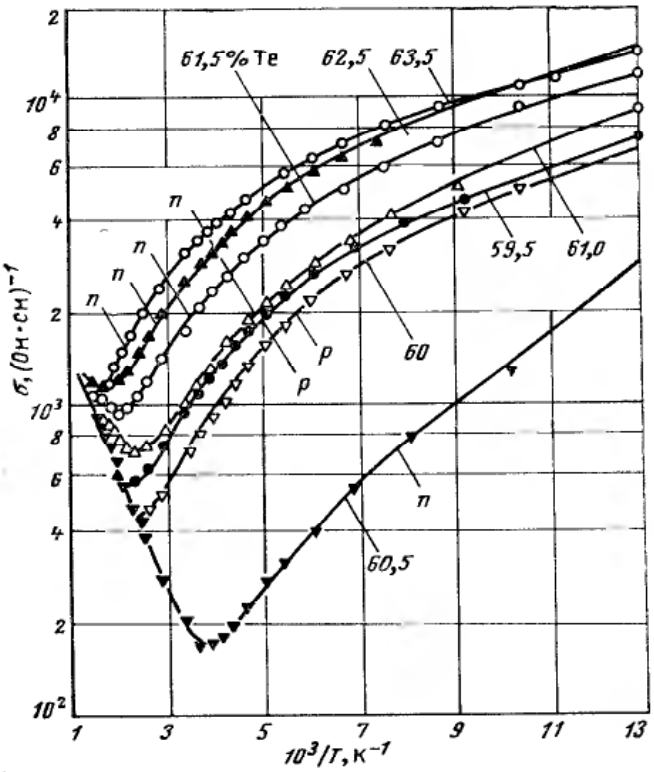
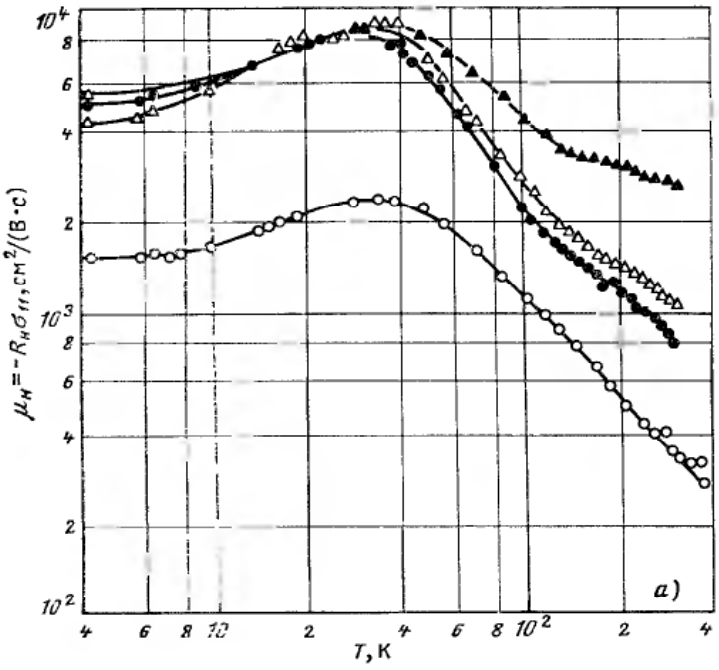


Рис. 22.230. Температурные зависимости проводимости (поперек оси c) для кристаллов Bi_2Te_3 n- и p-типа [203]:
числа у кривых — атомное содержание Te, %



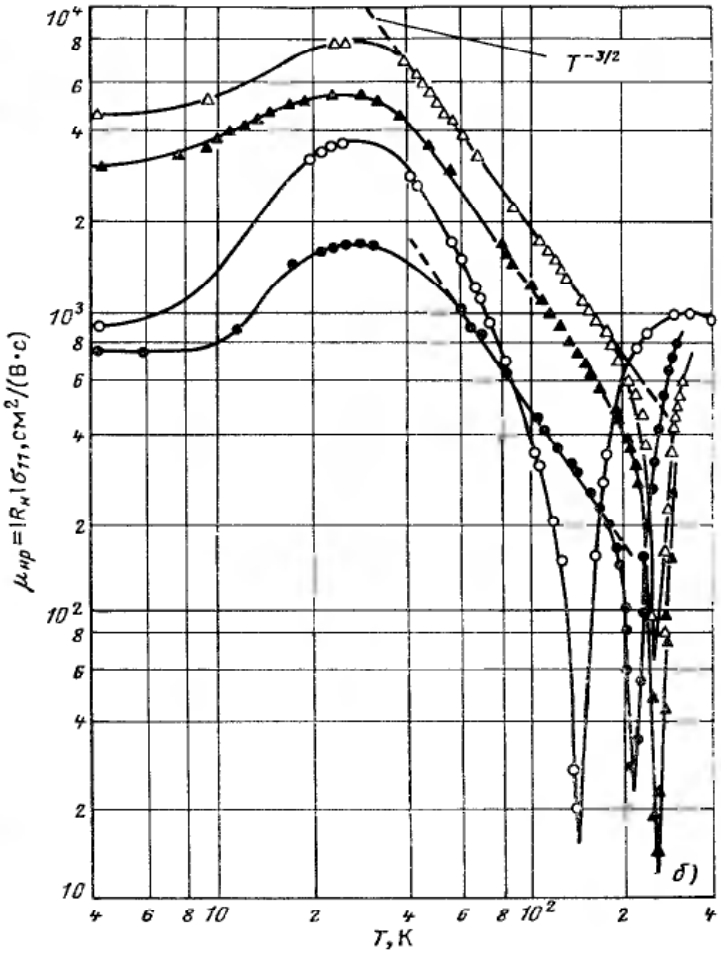


Рис. 22.229. Температурные зависимости холловской подвижности электронов ($а$) и дырок ($б$) в кристаллах n-Bi_2Se_3 ($а$) и p-Bi_2Se_3 ($б$) [203]:
концентрация носителей, 10^{17} см$^{-3}$: ○ — 1,6 ($а$); 0,69 ($б$); ● — 1,2 ($а$); 5,4 ($б$); △ — 0,87 ($а$); 6,7 ($б$); ▲ — 5,4 ($а$); 0,72 ($б$)

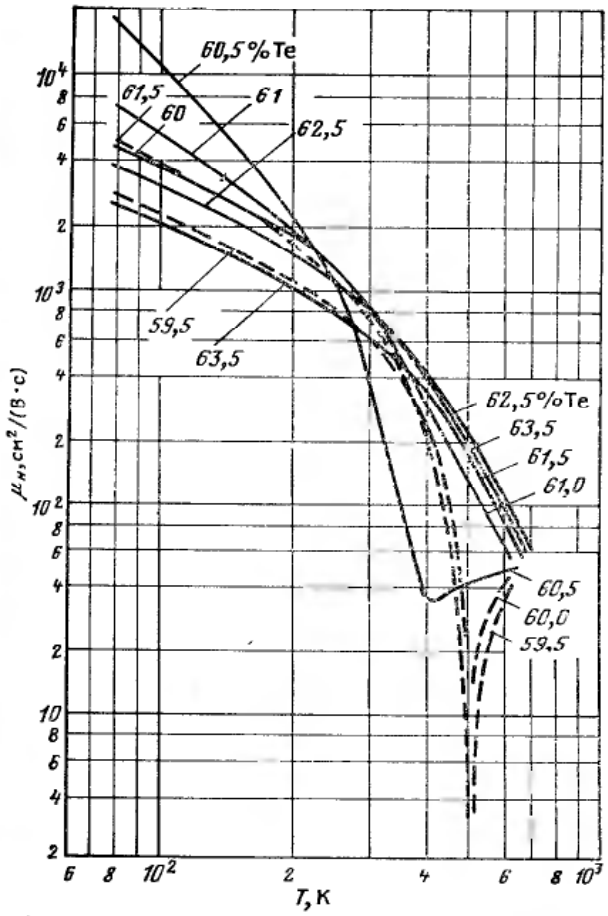


Рис. 22.231. Температурная зависимость холловской подвижности носителей поперек оси c в кристаллах n-Bi_2Te_3 (пунктирные линии) и p-Bi_2Te_3 (сплошные линии) [128]:
числа у кривых — атомное содержание Te, %

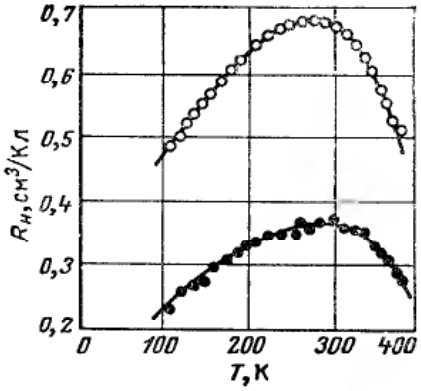


Рис. 22.232. Температурные зависимости коэффициента Холла для Bi_2Te_3 в геометрии $I \perp c \| B$ (●) и $I \perp c \perp B$ (○) [174]

22.3.6. Соединения типа $A^{VI}B^{IV}$—$A^{VI}B^{VI}$

Известно полупроводниковое соединение типа $A^{VI}B^{VI}$ p-$CrSi_2$ с очень малой подвижностью дырок (E_g=1,3 эВ [16])

Таблица 22.26. **Полупроводниковые соединения $A^{VI}B^{VI}$**

Соединение	Кристаллическая структура		E_g, эВ	μ_n, μ_p, см²/(В·с)
	Система, группа	a, b, c, нм		
CrO_3	Куб., C_{2v}^{16}	0,5743 (a); 0,8557 (b); 0,4789 (c) [242]	1,4 [242]	—
Cr_2O_3	Гекс., D_{3d}^{6}	0,4954 (a); 0,13584 (c) [242]	1,59—1,63 [242]	—
$CrTe_2$	—	—	0,17 [16]	12 (μ_n) (70)
MoS_2	Гекс., D_{6h}^{4}	0,315 (a); 0,1230 (c) [1]	1,2 [10]	200 — 300 (μ_p) [249]
TeO_2	Тетр., D_{4h}^{14}	0,479 (a); 0,377 (c) [1]	1,5 [10]	—

Таблица 22.27. Электрофизические свойства сплавов Se_xTe_{1-x} [293]

Кристаллическая структура		ρ, г/см³	E_g, эВ	$(m_n m_p)^{1/2}/m_0$	n_i, см$^{-3}$	μ_n ($\parallel c$), см²/(В·с)	μ_p ($\parallel c$), см²/(В·с)
Система	a, b, c, нм						
Триг.	$x=0-1$; 0,446—0,438 (a) 0,593—0,492 (c)	6,2 (x=0,05) 5,01 (x=0,9)	0,36 (x=0,016) 0,2 (x=0,55) 0,4 (x=0,85)	0,17 (x=0,05) 0,22 (x=0,1)	10^{14}—10^{16} (x=0÷1)	10000 (x=0,1)	1000 (x=0,1) 350 (x=0,2) 17 (x=0,5) 48 (x=0,8)

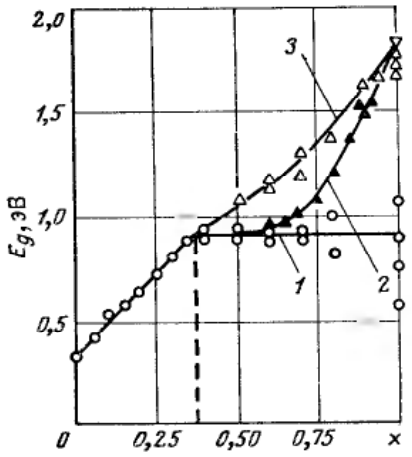


Рис. 22.233. Зависимость ширины запрещенной зоны E_g в Se_x Te_{1-x} от x [111]:

1 — собственная проводимость; *2* — фотопроводимость; *3* — температурная зависимость проводимости

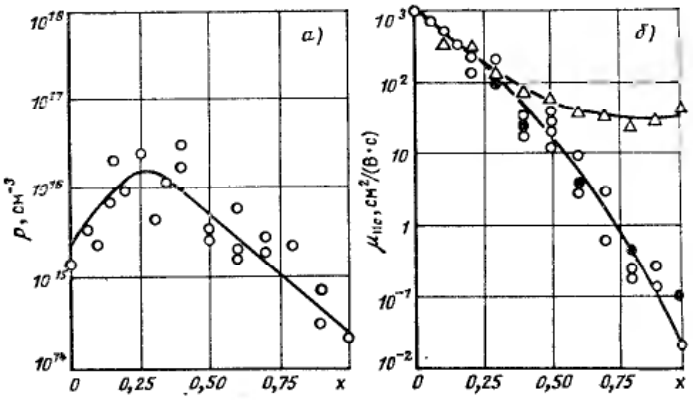


Рис. 22.234. Зависимости концентрации дырок в Se_xTe_{1-x} от x из данных по измерению термо-ЭДС [87] (*а*) и подвижности дырок в Se_x Te_{1-x} от x при $T=300$ К (*б*), определенные различными методами [111]:

△ — по магнетосопротивлению; ○ — по термо-ЭДС; ● — по эффекту Холла

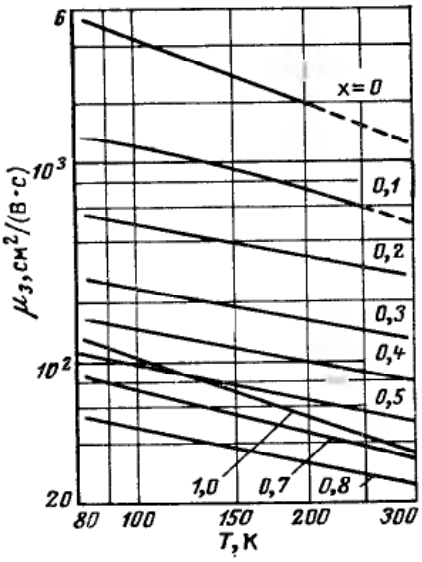


Рис. 22.235. Температурная зависимость подвижности дырок в Se_x Te_{1-x} в направлении оси c при различных значениях x (из данных по измерению магнетосопротивления) [87]

22.3.7. Соединения типа $A^{VII}B^{III}$—A^{VII}—B^{VI}

Известны полупроводниковые соединения $MnAl_3$ типа $A^{VII}B^{III}$ ($E_g=0,45\div0,58$ эВ, $\mu_n \gtrsim 200$ см²/(В·с), $\mu_p \sim$ ~ 200 см²/(В·с) [242]) и $ReSi_2$ типа $A^{VII}B^{IV}$ ($E_g=$ $=0,13$ эВ [16]) и MnSi, кристаллизующееся в кубической решетке ($a=0,456$ нм, $E_g=0,5\div0,6$ эВ, $\mu_p=10\div40$ см²/(В·с) [242]).

Таблица 22.28. **Полупроводниковые соединения $A^{VII}B^{VI}$** [288]

Соединение	Кристаллическая структура: Система	Кристаллическая структура: a, b, c, нм	ρ, г/см³	$T_{пл}$, К	T_D, К	T_N*1, К	E_g, эВ
MnS	Куб.	0,522	3,83	1890	—	150	—
MnSe	То же	0,545	5,35	1780	360	150	0,7
MnTe*2	Гекс.	0,415 (a); 0,671 (c)	—	1470	160	310	1.3
MnS_2	Куб., T^6	0,610	—	677	—	48	—
$MnSe_2$	То же	0,643	—	863	—	75	0,15
$MnTe_2$	То же	0,695	—	1010	—	84	0,01—0,04
MnO_2*3	Ромб.	0,927 (a); 0,287 (b); 0,453 (c)	—	—	—	92	0,13—0,19

*1 Все соединения, приведенные в табл. 22.28, — антиферромагнетики, T_N — температура Нееля.

*2 m_D/m_0 — 0,25 ($\perp c$) и 0,47; $\mu_n \simeq 1$ см²/(В·с) [106].

*3 $\mu_n \simeq 1{,}2$ см²/(В·с) [242].

22.3.8. Соединения типа $A^{V\,III}B^{V}$—$A^{VIII}B^{VI}$

Соединения типа $A^{VIII}B^{V}$ изучены слабо. Зона проводимости $PtSb_2$ — восемь эллипсоидов вращения, большие оси которых направлены вдоль [111]. Валентная зона — шесть эллипсоидов вращения, расположенных вдоль осей [100] [41]. Энергия прямого перехода E_d=0,4 эВ, E_g соответствует непрямому переходу [175].

Таблица 22.29. **Полупроводниковые соединения $A^{VIII}B^{V}$**

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, b, c, нм	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	m_n/m_0	m_p/m_0	μ_n, см²/(В·с)
$CoSb_2$	Орторомб.	0,321 (a); 0,578 (b); 0,642 (c) [1]	—	0,2 [16]	—	—	300 [16]
$CoSb_3$	Куб., T_h^5	0,9034 [242] 0,9936 [242]	1131 [249]	0.5 [16. 249]	—	—	—
$PtSb_2$*	Куб., T_h^6	0,643 [1]	1503 [41]	0,08 [41] 0,1 [288]	0,42—0,54 [41] 1,4 [41]	0,57—0,72 (m_d) [41] 0,168 ($m_{\parallel}$) [175] 0,098 ($m_{\perp 1}$) [175] 0,06 ($m_{\perp 2}$) [175]	$3{,}26\cdot10^6\,T^{-1.57}$ [288]

* $\varepsilon_0 = 32$; $n_i = 1{,}32\cdot10^{16}\,T^{3/2}\exp(0{,}11\ \text{эВ}/2\,\kappa T)$ [288].

Таблица 22.30. **Полупроводниковые соединения $A^{VIII}B^{VI}$**

Соединение	Кристаллическая структура: Система, группа	Кристаллическая структура: a, b, c, нм	$T_{пл}$, К	E_g, эВ	μ_n, см²/(В·с)
Fe_2O_3	Ромбоэдр.	0,5427 [242]	1500 [242] 1838 [16]	1,6 [16] 2,2 [242]	—
FeS_2	Куб., T_h^5	0,5405 [242]	962 [249]	1,25 [16]	200 [16]
FeS_2	Ромб., D_{2h}^{12}	0,358 (a); 0,479 (b); 0,572 (c) [1]	1183*1 [16]	0,95 [16]	—
$FeTe_2$	То же	0,385 (a); 0,534 (b); 0,626 (c) [1]	1015*1 [16]	0,46 [16]	1 [51]
NiO*2	Куб., O_h^5	0,418 [1]	3170 [42]	3,7*3 [95]	0,2 [25] 0,1 [95]

*1 Приведена температура кристаллизации, так как эти дихалькогениды плавятся с разложением.

*2 $\rho = 6{,}6$ г/см³ [132]; $\varepsilon_0 = 11{,}9$; $\varepsilon_\infty = 4{,}75$ [29]. Полярный полупроводник может обладать магнитным порядком.

*3 Соответствует не ширине запрещенной зоны, а электронному переходу $3d \rightarrow 4s$, ширина запрещенной зоны значительно больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Landolt-Bornstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomic, Geophysik, Technik. Berlin: J. Springer. 1955. Bd. 1, S. 4.

2. **Wickoff R. W. G.** Crystall Structures N. Y.: Interscі. Publ. 1953.

3. **Харциев В. Е.**//Физика твердого тела. 1662. Т. 4. С. 433—436.

4. **Horn F. H.**//Boron/Ed.: Kohn J. A., Nye W. F., Ganle C. K., N. Y. Plenum Press. 1960. Vol. 1. P. 111—118.

5. **Голикова О. А., Соловьев Н. Е., Угай Я. А., Фейгельман В. А.**//Физ. и техн. полупроводников. 1979. Т. 13. С. 825—827.

6. **Golikova O. A.**//J. Less-Common Met. 1982. Vol. 82. P. 362—366.

7. **Голикова О. А., Жубанов М. Ж., Климашин Г. Н.**// Физ. и техн. полупроводников. 1968. Т. 2. С. 548—551.

8. **Asanable S.**//J. Phys. Soc. Jap. 1960. Vol. 15. P. 989—995.

9. **Harbeke G., Tosatti E.**//Proc. 12 Intern. Conf. Phys. Sem. Stuttgart 1974. P. 626—629.

10. **Бьюб Р.** Фотопроводимость твердых тел: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1962.

11. **Смит Р.** Полупроводники: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1962.

12. **Ybuki I.**//J. Phys. Soc. Jap. 1955. Vol. 10. P. 549—563.

13. **Drabble G.**//J. Phys. Soc. 1956 Vol. B69. P. 1101—1140. 1958. Vol. B72. P. 380—387.

14. **Golikova O. A., Subanov M. Z.**//Boron/Ed. Niemyski T. Warsaw. Pol. Sci. Publ. 1970. Vol. 3. P. 269—273.

15. **Rodot M.**//Phys. Stat. Sol. 1963. Vol. 3. P. 10—13.

16. **Угай Я. А.** Введение в химию полупроводников. М.: Высшая школа. 1965.

17. **Warschauer D.**//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 1853—1858.

18. **Кот М. В., Крецу Л. В.**// Изв. АН СССР Сер. физ. 1964. Т. 281. С. 259—299.

19. **Mort J.**//Phys. Rev. Lett. 1967. Vol. 18. P. 540—547.

20. **Caywood J. M., Mead C. A.**//J. Phys. Chem. Sol. 1970. Vol. 31. P. 983—985.

21. **Hopfield J. J., Thomas D. G.**//Phys. Rev. 1961 Vol. 122. P. 35—38.

22. **Dimmock J. O., Wheeler R. J.**//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 2271—2277.

23. **Noguet P. C.**//J. Phys. 1965. Vol. 26. P. 317—323.

24. **Lavine C. F., Ewald A. W.**//J. Phys. Chem. Sol. 1971. Vol. 32. P. 1121—2123.

25. **Богомолов В. Н., Кудинов Е. К., Фирсов Е. А.**// Физика твердого тела. 1967. Т. 9. С. 3175—3191.

26. **Prener I., Woodbury H. H.**//Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris. 1964. P. 1231—1236.

27. **Хилсум К., Роуз-Инс А.** Полупроводники типа $A^{III}B^{V}$: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1963.

28. **Мосс Т.** Оптические свойства полупроводников: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит. 1961.

29. **Бреслер М. С., Редько Н. А.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1972. Т. 34. С. 149—154.

30. **Grosse P.** Springer Tracts in Modern Phys.//Ed.: G. Hohler. Berlin—Heidelberg—N. Y.: J. Springer. 1969 Vol. 48.

31. **Грамацкий В. И., Мушинский В. П.**//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1964. Т. 28. С. 1077—1087.

32. **Ахундов А., Абдуллаев Г. Б., Гуссейнов Г. Д.**// Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris 1964. P. 1277—1282.

33. **Veric C.** New Develop. Semiconductors. Leyden, 1973. P. 524—519.

34. **Мирзабаев М., Тучкевич В. М., Шмарцев Ю. В.**// Изв. АН СССР. Сер. физ. 1964 Т. 28. С. 1300—1309.

35. **Парфеньев Р. В., Погарский А. М., Фарбштейн И. И.**//Физика твердого тела. 1963. Т. 4. С. 2630—2637.

36. **Evans R. L., Hazelwood R. A.**//P. Phys. D. 1969 Vol. 2. P. 1507—1512.

37. **Gibbons Dy., Spear W. E.**//J. Phys. Chem. Sol. 1966. Vol. 27. P. 1917—1923.

38. **Fuldner J.** e. a.//Proc. XI Conf. Phys. Semicond., Warsawa, 1972. P. 351—357.

39. **Nitzki V., Stossel W.**//Phys. Stat. Sol. 1970. 39(b). P. 309—313.

40. **Rodot M.**//Compt. Rend. Acad. Sci. 1965. Vol. 260. P. 1908—1911.

41. **Emtage P. R.**//Phys. Rev. 1965. Vol. 138. P. 24—311.

42. **Botling J. F.**//J. Chem. Phys. 1960. Vol. 33. P. 305—311.

43. **Справочник** по полупроводниковым диодам, транзисторам и интегральным схемам/Под ред. Н. Н. Горюнова. М.: Энергия. 1972.

44. **Von Liebe L.**//Ann. Phys. 1965. Bd. 7, № 15. S. 179—183.

45. **Salzer O., Nieke H.**//Ann. Phys, 1965. Bd. 7. S. 192—198.

46. **Onuki**//J. Phys. Soc. Jap. 1965. Vol. 20. P. 171—177.

47. **Кот М. В., Панасюк Л. М., Симашкевич А. В., Цуркан А. Е.**//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 1242—1243.

48. **Yaschke R.**//Ann. Phys. 1965. Bd. 7. № 15. S. 106—109.

49. **Ломакина Г. А.**//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 600—608.

50. **Komiga H.**//Phys. Rev. 1964. Vol. 133. P. A1679—A1682.

51. **Suchet J.**//Compt. Rend. Acad. Sci. 1964. Vol. 259. P. 3219—3262.

52. **Rosenman M. J.**//Ibid. 1964. Vol. 259. J. 2621—2622.

53. **Adams A. R., Spear W. E.**//J. Phys. Chem. Sol. 1964. Vol. 25. P. 1113—1118.

54. **Hacke J.**//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 2484—2487.

55. **Redin A. D.**//Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 1916—1919.

56. **Rodot M.**//Compt. rend. Acad. Sci. 1964. Vol. 258. P. 5414—5418.

57. **Jeavons A. P., Sannders Y. A.**//Phys. Roy. Soc. 1969. Vol. A310. P. 415—421.

58. **Bludau W., Onton A., Heinke W.**//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 1846—1852.

59. **Dunstadter H.**//Z. Phys. 1954. Bd. 137. S. 383—388.

60. **Вольфштейн В. М., Фистуль В. И.**//Электроника и ее применение. Сер. Итоги науки и техники. М.: Изд. ВИНИТИ АН СССР, 1979. Т. 4.

61. **Соммер А. Х.** Фотоэмиссионные материалы: Пер. с англ. М.: Мир. 1972.

62. **Физические** свойства халькогенидов — редкоземельных элементов/Под ред. В. П. Жузе. Л.: Наука. 1973.

63. **Irvin J. C.**//Bell Syst. Tech. J. 1962. Vol. 41. P. 387—393.

64. **Jacoboni C., Canali C., Ottaviani G., Alberigi Quaranta A.**//Solid. Stat. Electron. 1977. Vol. 20. P. 77—81.

65. **McLean T. P.**//Progress in Semiconductors/Ed. A. F. Gibson. Lond.: Heywood. 1960. Vol. 5.

66. **Park V. S.**//Phys. Rev. 1966. Vol. 143. P. 512—515.

67. **Lott S. A., Synch D. W.**//Phys. Rev. 1966. Vol. 141. P. 681—688.

68. **Camassel J., Auvergne D., Matthieu H. e. a.**//Sol. Stat. Comm. 1973. Vol. 13. P. 63—68.

69. **Marby J. A.**//Phys. Rev. 1965. Vol. 140. P. 304—312.

70. **Arumi Z., Mancu P.**//Rend. Semin. Fac. Sci. Univ. Cagliari, 1963. Vol. 33, № 3—4. P. 26—29.

71. **Morin F. J.**//Phys. Rev. 1954. Vol. 93. P. 62—69.

72. **Prince M. B.**//Ibid. 1953. Vol. 92. P. 681—688.

73. **Голикова О. А., Мойжес Б. Я., Стильбанс Л. С.**// Физика твердого тела. 1961. Т. 3. С. 3105—3109.

74. **Logan R. A., Rowell J. M., Trumbore F. A.**//Phys. Rev. 1964. Vol. 136A. P. 1751—1763.

75. **Whitaker J.**//Sol. Stat e Electron. 1965. Vol. 8. P. 649—652.

76. **Braunstein R., Moore A. R., Herman F.**//Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 695—703.

77. **Zdanowich W., Wojkowski A.**//Phys. Stat. Sol. 1965. Vol. 8. P. 569—574.

78. **Douglas R.**//J. Phys. Chem. Sol. 1965. Vol. 21. P. 329—334.

79. **Richard D.**//Ibid. 1965. Vol. 26. P. 439—443.

80. **Busch G., Vogt O.**//Helv. Phys. Acta. 1960. Vol. 33. P. 437—447.

81. **Wooten J., Condas Y. A.**//Phys. Rev. 1963. Vol. 131. P. 657—662.

82. **Tamura H., Masumi T.**//Sol. Stat. Commun. 1973. Vol. 12. P. 1183—1185.

83. **Hall R. F., Wright H. C.**//Brit. J. Appl. Phys. 1967. Vol. 18. P. 33—38.

84. **Цидильковский И. М.** Электроны и дырки в полупроводниках. М.: Наука. 1972.

85. **Орлова Н. И., Шишкин П. Т.**//Изв. АН СССР. Сер. физ.-мат. 1964. № 4. С. 53—59.

86. **Winker H.**//Helv. Phys. Acta. 1955. Vol. 28. P. 633—639.

87. **Meli H., Stuke J.**//Phys. Stat. Sol. 1971. Vol. 45. P. 163—167.

88. **Сорокин Г. П.**//Изв. вузов. Сер. физ. 1965. № 4. С. 140—144.

89. **Wallis Y.**//Ann. Phys. 1956. Vol. 17. P. 401—403.

90. **Pollack Y. P., Trivich D.**//J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. P. 163—165.

91. **Okamoto K., Kawai S.**//Jap. J. Appl. Phys. 1973. Vol. 12. P. 1130—1138.

92. **Восканян А. А., Инглизян П. Н., Лалыкин С. П.**// Физ. и техн. полупроводников. 1978. Т. 12. С. 2096—2099.

93. **Горбачев В. В., Путилин И. М.**//Phys. Stat. Sol. (a). 1973. Vol. 16. P. 553—559.

94. **Сорокин Г. П., Пеншев Ю. М., Оуш П. Т.**//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 2244—2245.

95. **Ксендзов Я. М., Драбкин И. А.** Там же. 1965. Т. 7. С. 1884—1887.

96. **Fortin E., Weichman F. L.**//Phys. Stat. Sol. 1964. Vol. 5. P. 515—519.

97. **Junod P.** e. a.//Phil. Mag. 1977. Vol. 36. P. 941—952.

98. **Алиев С. А., Суюнов У. Х., Араслы Д. Г., Алиев М. И.**//Физ. и техн. полупроводников. 1973. Т. 7. С. 1086—1091.

99. **Aulich E., Brebner J. L., Mooser E.**//Phys. Stat. Sol. 1969. Vol. 31. P. 129—137.

100. **Угай Я. А., Завальский Ю. П., Угай В. А.**//Докл. АН СССР. 1965. Т. 163. С. 663—666.

101. **Junod P.**//Helv. Phys. Acta. 1959. Vol. 32. P. 567, 601—604.

102. **Davlen V. R. M.**//Phys. Rev. 1966. Vol. 143. P. 666—669.

103. **Komiga H.**//Ibid. 1964. Vol. A133. P. 679—687.

104. **Minder R., Ottaviani G., Canali C.**//J. Phys. Chem. Sol. 1976. Vol. 37. P. 417—424.

105. **Leotin J., Barbaste R., Askenazy S.** e. a.//Sol. Stat. Commun. 1974. Vol. 15. P. 693—699.

106. **Wassher J. D., Seuter R. M. J., Haas C.**//Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris. 1964. P. 1269—1275.

107. **Коломиец Б. Т., Лебедев Е. А., Мазек Ф. Т. и др.** — Ibid P. 1283—1286.

108. **Wood C., Harrap C., Kane W. M.**//Phys. Rev. 1961. Vol. 121. P. 978—983.

109. **Masumi T., Ahrenkiel R. K., Brown F. C.**//Phys. Stat. Sol. 1965. Vol. 11. P. 163—167.

110. **Ponpon L. P.**//IEEE Trans. Nucl. Sci. 1975. Vol. S—22. P. 182—186.

111. **Beyer W., Meli H., Stuke J.**//Phys. Stat. Sol. (b). 1971. Vol. 45. P. 153—162.

112. **Krevs V. E., Lutsiv R. V., Pashovskii M. B., Retrov P. P.**//Ibid. 1974. Vol. 65. P. K43—K45.

113. **Hanson R. C.**//J. Phys. Chem. 1962. Vol. 66. P. 2376—2383.

114. **Абрикосов Н. Х. и др.** Полупроводниковые соединения, их получение и свойства. М.: Наука. 1967.

115. **Reimherr A.**//General Survey of the Semiconductor Field. National Bureau of Standarts. Technical Note. 1962. P. 153—157.
116. **Полупроводники**/под ред. Н. Б. Хенней: Пер. с англ. и нем. М.: Изд-во иностр. лит. 1962.
117. **Материалы**, используемые в полупроводниковых приборах/Под ред. К. Хоггарта: Пер. с англ. М.: Мир. 1968.
118. **Thermophysical** Properties of High Temperature Solid Materials. Purdue Univer. 1967.
119. **Burnham D. C., Brown F. C., Knox R. S.**//Phys. Rev. 1960. Vol. 119. P. 1560—1568.
120. **Ahrenkiel R. K.**//Phys. Rev. 1969. Vol. 18. P. 180—188.
121. **Горюнова Н. А.** Сложные алмазоподобные полупроводники. М.: Советское радио. 1968
122. **Wagrur R. J., Ewald K. A.**//J. Phys. Chem. Sol. 1971. Vol. 32. P. 697—673.
123. **Родо М.** Полупроводниковые материалы: Пер. с франц. М.: Металлургия. 1971.
124. **Добролеж С. А.** Карбид кремния. Киев: Гос. изд-во техн. лит. УССР. 1963.
125. **Равич Ю. И., Ефимова Б. А., Смирнов И. А.** Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца. — М.: Наука. 1968.
126. **Коломиец Н. В., Лев Е. Я., Сысоева Л. М.**//Физика твердого тела. 1963. Т. 5. С. 2871—2878.
127. **Albers W. e. a.** /J. Appl. Phys. Suppl. 1961. Vol. 32. P. 2220—2231.
128. **Champness C. H., Kipling A. L.**//Can. J. Phys. 1966. V. 44. P. 769—773.
129. **Соболев В. В.**//Физика твердого тела. 1970. Т. 12. С. 2687—2693.
130. **Cuhen M. L., Au-Yang M. T.**//Phys. Rev. 1969. Vol. 178. P. 1358—1362.
131. **Winkler H.**//Helv. Phys. Acta. 1955. Vol. 28. P. 663—669.
132. **Agrain P., Balkansky M.** Table de constante des Semiconducteurs. Paris: Pergamon Press, 1961.
133. **Turner W. J., Fisher A. S., Reese W. E.**//J. Appl. Phys. 1961. Suppl. Vol. 32. P. 2241—2249.
134. **Heller M. W. Damelson Y. C.**//J. Phys. Chem. Sol. 1962. Vol. 23. P. 601—608.
135. **Redin R. D., Morris R. G., Danielson G. C.**//Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 1916—1920.
136. **Li P. W., Lee S. N., Danielson G. C.**//Ibid. 1972. Vol. B6. P. 442—453.
137. **Crossman L. D., Danielson G. C.**//Ibid. 1968. Vol. 171. P. 867—872.
138. **Физика** и химия соединений типа $A^{III}B^{VI}$: Пер. с англ./Под ред. А. С. Медведева. М.: Мир. 1970.
139. **Hamilton P. H.**//Semicond. Proc. Sol. Stat. Technol. 1964. Vol. 7, № 6. P. 15—19.
140. **Betts D. D.**//Canad. J. Phys. 1961. Vol. 39. P. 223—231.
141. **Robic R. A., Edwards J. L.**//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 2659—2673.
142. **Rode D. L.**//Phys. Rev. 1970. Vol. B2. P. 4036—4043.
143. **Милославский В. К., Шкляревский О. Н.**//Физ. и техн. полупроводников. 1971. Т. 5. С. 926—929.
144. **Watanabe H., Wada H., Takahashi T.**//Jap. J. Appl. Phys. 1964. Vol. 3. P. 617—621.
145. **Полупроводники** с узкой запрещенной зоной и их применение: Пер. с англ. М.: Мир. 1969.
146. **Umeda J.**//J. Phys. Soc. Jap. 1964. Vol. 19. P. 2052—2058.
147. **Geik R., Hakel W. J., Perry C. H.**//Phys. Rev. 1966. Vol. 148. P. 824—827.
148. **Balkansky M., Zellag B. A. M., Longen D.**//J. Phys. Chem. 1966. Vol. 27. P. 299—304.
149. **Segall B., Lorenz M., Woodbury H.**//Phys. Rev. 1963. Vol. 129. P. 2471—2477.
150. **Медведева З. С.** Халькогениды элементов III Б подгруппы периодической системы. М.: Наука. 1968.
151. **Tagiev B. F.**//Phys. Stat. Sol. (a). 1970. Vol. 3. P. K119—K120.
152. **Catsuyama C., Watanabe Y., Hamaguchi C.** e. a.// J. Phys. Soc. Jap. 1970. Vol. 29. P. 150—155.
153. **Aven M.**//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 1204—1207.
154. **Park Y. S., Hemenger P. M., Chung C. H.**//Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 18. P. 45—49.
155. **Reignold D. G., Litton C. W., Collins T.**//Phys. Rev. 1965. Vol. 146. P. 1726—1729.
156. **Seiler D. G., Galazka R. R., Becher W. M.**//Ibid. 1971. Vol. B3. P. 4274—4288.
157. **Баширов Р. И., Таджиев Р. М.**//Физика твердого тела. 1970. Т. 4. С. 1936—1943.
158. **Bush G., Moldanova M.**//Helv. Phys. Acta. 1962. Vol. 35. P. 500—508.
159. **Dietz R. F., Hopfield J. J., Thomas D. G.**//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 2282—2289.
160. **Pigon K.**//Helv. Phys. Acta. 1968. Vol. 41. P. 1104—1109.
161. **Fisher P., Fan H.**//Bull. Amer. Phys. Soc. 1959. Vol. 4. P. 409—415.
162. **Рывкин С. М.** Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз. 1963.
163. **Zdanowicz W., Kenkie Z.**//Bull. Acad. Pol. Sci. Ser. Sci. Chem. 1964. Vol. 12. P. 729—734.
164. **Fingold L.**//Phys. Rev. Lett. 1964. Vol. 13. P. 233—238.
165. **Шевченко В. Я.**//Журн. неорганические материалы. 1975. Т. 11. С. 1719—1726.
166. **Zdanowicz W., Wielzak B., Zdanowicz P.**//Acta Phys. Polon. 1975. Vol. A48. P. 27—31.
167. **Turner W. C., Fischler A. S., Reese W. G.**//Phys. Rev. 1961. Vol. 121. P. 759—767.
168. **Black J.**//Phys. Chem. Sol. 1957. Vol. 2. P. 240—248.
169. **Смирнов И. А., Шадричев Е. В., Кутасов В. А.**// Физика твердого тела. 1969. Т. 11. С. 3311—3319.
170. **Маделунг О.** Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп: Пер. с англ. М.: Мир. 1967.
171. **Long D.** Energy Bands in Semiconductors. N. Y.—Lond.: Sydney Interscience Publ. A Division John Wiley and Sons. 1968.
172. **Minden H. T.**//Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 17. P. 358—364.
173. **Kessler F. R.**//Phys. Stat. Sol. 1964. Vol. 6 P. 3—9.
174. **Stordeur M., Kuhnberger W.**//Phys. Stat. Sol. (b) 1975. Vol. 69. P. 377—385.
175. **Damon D. H., Miller R. C., Emtage P. R.**//Phys Rev. B. 1972. Vol. 5. P. 2175—2183.
176. **Becla P., Gummieuny Z., Misiewicz J.**//Opt. Appl. 1979. Vol. 9. P. 143—149.
177. **Шевченко В. Я., Маренкин С. Ф., Пономарев В. Ф.**//Журн. неорганические материалы. 1977. Т. 13. С. 1898—1900.
178. **Steigmeier E. F., Kudman I.**//Phys. Rev. 1966. Vol. 141. P. 767—774.
179. **Pigon K.**//Bull. Acad. Pol. Sci. Ser. Sci. Chem. 1961. Vol. 9. P. 751—757.
180. **Masumoto K., Komiya H.**//J. Jap. Instrum. Met. 1964. Vol. 28. P. 273—279.
181. **Цуркан А. Е., Максимова О. Г., Верлан В. И.**// Сложные полупроводники и их физические свойства. Кишинев: Штиница. 1971. С. 128—134.
182. **Naake M. J., Belcher S. C.**//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 3064—3067.

183. **Domingo G., Itoga R. S., Kannewur C. R.**//Phys. Rev. 1966. Vol. 143. P. 536—539.

184. **Марков Ю. Ф.** Исследование оптических свойств полупроводниковых соединений в далекой инфракрасной области спектра. Дис. ...канд. физ.-мат. наук. Л. ФТИ им. А. Ф. Иоффе. 1972.

185. **Ehrenreich H.**//Phys. Rev. 1960. V. 120. P. 1951—1954.

186. **Панфилов В В., Субботин Л. С., Верещатин Л. Ф.**//Докл. АН СССР. 1971. Т. 96. С. 559—567.

187. **Полупроводниковые** соединения II—V групп. М.: Наука. 1978.

188. **Heller M. W., Babiskin J., Radff R. L.**//Phys. Rev. 1971. Vol. A36. P. 363—366.

189. **Zdanowicz W., Wojakowski A.**//Phys. Stat. Sol. 1966. Vol. 16. P. K129—K131.

190. **Zdanowicz W., Wojakowski A.**//Ibid., 1965. Vol. 8. P. 569—573.

191. **Arushanov E. K., Lashul A. V., Mashovets D. V.**// Phys. Stat. Sol. (b). 1980. Vol 102. P. K121—K124.

192. **Gelten M. J., Von Liehout A., van Es C., Blout F. A. P.**//J. Phys. 1978. Vol. CII. P. 227—237.

193. **Slack G. A.**//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 143 P. 666—674.

194. **Мороз А. И., Одарич В. А.**//Укр. физ. журн. 1971. Т. 16. С. 1501—1504.

195. **Turner W. Y., Fischler A. S., Reese W. E.**//Phys. Rev. 1961. Vol. 121. P. 759—767.

196. **Bloom F. A. P., Gelten M. J.**//Ibid. 1979. Vol. B19. P. 2411—2419.

197. **Коломиец Б. Т., Мазец Т. Ф., Сарсембинов Ш. Ш.**//Физ. и техн. полупроводников. 1971. Т. 5. С. 2301—2305.

198. **Шутов С. О., Соболев В. В., Смешливый Л. И.** Полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Кишинев: Изд-во АН МССР. 1970. С. 155—163.

199. **Whitsett C. R., Nelson D. A.**//Phys. Rev. B. 1972. Vol. 5. P. 3125—3134.

200. **Overhof H.**//Phys. Stat. Sol. 1971 Vol. 43. P. 221—228.

201. **Miller K. A., Schneider J.**//Phys. Lett. 1963. Vol. 4. P. 288—293.

202. **Look D. C., Moore D. L.**//Phys. Rev. B. 1972. Vol. 5. P. 3406—3412.

203. **Kohler H., Fabricins A.**//Phys. Stat. Sol. (b). 1975. Vol. 71. P. 487—493.

204. **Bloom F. A. P.**//Intern. Summ. School on Narrow—gap Semicond. Phys and Applic. Nimes (France). 1979. P. 191—198.

205. **Kawasaki T., Tanaka T.**//J. Phys. Soc. Jap. 1966. Vol. 21. P. 2475—2483.

206. **Eichler W., Simon G.**//Phys. Stat. Sol. (b). 1978. Vol. 86. P. K85—K87.

207. **Helbig R., Wagner P.**//J. Phys. Chem. Sol. 1974. Vol. 35. P. 327—328.

208. **Hagenberg F.**//Thesis. D83. T. U. Berlin. 1980.

209. **Grant F. A.**//Rev. Mod. Phys. 1959. Vol. 31. P. 646—652.

210. **Yu P. Y., Cardona M.**//J. Phys. Chem. Sol. 1973. Vol. 34. P. 29—37.

211. **Frederikse H. P. R.**//J. Appl. Phys. 1961. Suppl. Vol. 32. P. 2211—2219.

212. **Остин И. Р., Мотт Н.** Физики о физике: Пер. с англ. М.: Знание. 1972.

213. **Frederikse H. P. R.**//J. Appl. Phys. Suppl. Vol. 32. P. 2211—2219.

214. **Кесаманлы Ф. П.**//Физ. и техн. полупроводников. 1974. Т. 8. С. 225—231.

215. **Kikuchi Y., Chubachi N., Iinuma K.**//Sendai Symp. Acustoelectron Jpn., 1968.

216. **Справочник** химика. М.: Химия. 1964.

217. **Spear W. E., Mort P.**//Proc. Phys. Soc. 1963. Vol. 81. P. 130—137.

218. **Крупишев Р. С., Абагян С. А., Давыдов А. А., Карушина А. А.**//Физ. и техн. полупроводников. 1972. Т. 6. С. 75.

219. **Kahan A., Lipson H. G., Loewinstein E. V.**//Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964. P. 1067—1071.

220. **Mitra S. S., Marshall R.**//Ibid. P. 1085—1090.

221. **Киреев П. С.** Физика полупроводников. М.: Высшая школа. 1969.

222. **Zallen R. e. a.**//Phys. Rev. 1970. Vol. B1. P. 4058—4064.

223. **Szusukiewicz W.**//Phys. Stat. Sol. (b). 1979. Vol. 91. P. 361—368.

224. **Wright G. B., Strauss A.J., Harman T. C.**//Phys. Rev. 1962. Vol. 125. P. 1534—1543.

225. **Фистуль В. И.** Сильно легированные полупроводники. М.: Наука. 1967.

226. **Prince M. B.**//Phys. Rev. 1954. Vol. 93. P. 1204—1213.

227. **Lehoczky S. L., Broerman J. G., Nelson D. A., Whitsett C. R.**//Ibid. 1974. Vol. B9. P. 1598—1620.

228. **Brebrick R. P., Scanlon W. W.**//Ibid. 1954. Vol. 99. P. 598—608.

229. **Stradling R.**//Sol. Stat. Commun. 1968. Vol. 6. P. 665—673.

230. **Cardona M.**//Phys. III—V Compounds. Acad. Press 1966. Vol. 3. P. 125—132.

231. **Stradling R.** Electronic Components. Lond.: Pergamon Press. Oct. 1958. P. 1135—1142.

232. **Walton A., Mishra U.**//Proc. Phys. Soc. 1967. Vol. 90. P. 1111—1118.

233. **Stradling R.**//Phys. Lett. 1966. Vol. 20. P. 217—226.

234. **Prince M. B.**//Phys. Rev. 1953. Vol. 92. P. 681—687.

235. **Кот М. В., Прилепов В. Д., Цуркан А. Е.**//Полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Кишинев: Изд-во АН МССР. 1970. С. 3—9.

236. **Машковский М. В.** Зарубежная электронная техника. М.: Изд. ЦНИИ «Электроника». 1974. Вып. 12. С. 3—9.

237. **Kalashnikow S. G.**//J. Phys. Chem. Sol. 1959. Vol. 8. P. 52—57.

238. **Ewald A. W., Tutle O. N.**//Ibid. P. 523—531.

239. **Иванов-Омский В. И., Коломиец Б. Т., Огородников В. К.**//Физ. и техн. полупроводников. 1970. Т. 4. С. 264—268.

240. **Galazka R. R.**//Phys. Lett. 1970. Vol. 32A. P. 101—107.

241. **Nasledow D. N., Shevchenko V. Ya.**//Phys. Stat. Sol. (a) 1973. Vol. 15. P. 3—8.

242. **Кристаллохимические,** физико-химические и физические свойства полупроводниковых веществ. М.: Изд-во стандартов. 1973.

243. **Гельмонт Б. Л., Иванов-Омский В. И., Коломиец Б. Т.**//Физ. и техн. полупроводников. 1971. Т. 5. С. 266—269.

244. **Szymanska W.**//Physics Narrow Gap Semiconductors. Proc. III Intern. Conf./Warzawa, Sept. 1977. Eds. J. Rauluszkewicz, M. Gorska, F. Kaczmarek. Warszawa: PWN-Polish-Sci. Publishers, 1978.

245. **Dziuba Z., Wrobel J.**//Phys. Stat. Sol. (b). 1980. Vol. 100. P. 379—384.

246. **Redin R. D., Morrich G., Danielson G. C.**//Phys. Rev. 1958. Vol. 109. P. 1916—1919.

247. **Kato N., Kumura M., Iwami M., Kawabe K.**// Jap. J. Appl. Phys. 1977. Vol. 16. P. 1623—1627.

248. **Grigas J.**//Krist. Techn., 1978. Vol. 13. P. 683—686.

249. **Соминский М. С.** Полупроводники. Л.: Наука. 1967.

250. **Stirn R. J., Becker W. M.**//Phys. Rev. 1966. Vol. 148. P. 907—914.
251. **Reid F. J., Willardson R. K.**//J. Electron. Control. 1958. Vol. 5. P. 54—62.
252. **Baars J., Jorger F.**//Sol. Stat. Commun. 1972. Vol. 10. P. 875—881.
253. **Hegems M., Montgomery H. C.**//J. Phys. Chem. Sol. 1973. Vol. 34. P. 885—893.
254. **Burstein E., Pinczuk A., Wallis R. F.**//J. Phys. Chem. Sol. 1971. Vol. 32, Suppl. № 1. P. 251—254.
255. **Rode D. L.**//Semiconductors and Semimetals/Eds. R. K. Willardson, A. C. Beers. N. Y:. Academ Press. 1975. Vol. 10.
256. **Casey H. C., Ermanis F., Wolfstirn K. B.**//J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 2945—2953.
257. **Solomon R.**//2nd Intern. Symp. GaAs and Related Compounds. 1968. Lond.: Inst. Phys. 1969. P. 11—15.
258. **Roy B., Ckakraberty B. R., Bhattacharya R., Dutta A. K.**//Sol. Stat. Commun. 1978. Vol. 25. P. 937—940.
259. **Wiley J. D.**//Semiconductors and Semimetals/Eds. R. K. Willardson, A. C. Beers. N. Y.: Academ. Press. 1975. Vol. 10.
260. **Vilms J., Garrett J. P.**//Sol. Stat. Electron. 1972. Vol. 15. P. 443—449.
261. **Marshall J. M.**//J. Phys. C. 1977. Vol. 10. P. 1283—1287.
262. **Дахно А. Н., Емельяненко О. В., Лагунова Т. С., Метревели С. Г.**//Физ. и техн. полупроводников. 1976. Т. 10. С. 677—681.
263. **Голованов В. В., Метревели С. Г., Снукаев Н. В., Старосельцева С. П.**//Там же. 1969. Т. 3. С. 120—122.
264. **Stillman G. E., Wolfe C. M., Dimmock J. O.**//Semiconductors and Semimetals/Eds. R. K. Willardson, A. C. Beers. N. Y.: Acad. Press. 1977. Vol. 12. P. 169—173.
265. **Трифонов В. И., Яременко Н. Г.**//Физ. и техн. полупроводников. 1971. Т. 5. С. 953—958.
266. **Яременко Н. Г., Потапов В. Т., Ивлева В. С.**// Там же. 1972. Т. 6. С. 1238—1243.
267. **Rode D. L.**//Phys. Rev. 1971. Vol. B3. P. 3287—3292.
268. **Schein L. B.**//Ibid. 1977. Vol. B15. P. 1024—1029.
269. **Филипчеико А. С., Большаков Л. П.**//Phys. Stat. Sol. 1976. Vol. 77. P. 53—57.
270. **Лихтер А. И., Пель Е. Г., Присяжнюк С. И.**// Phys. Stat. Sol. (a). 1972. Vol. 14. P. 265—275.
271. **Kippermann A. H. M.**//Sol. Stat. Commun. 1971. Vol. 9. P. 1825—1833.
272. **Kipperman A. H. M., Van der Leeden G. A.**//Ibid 1968. Vol. 6. P. 657—666.
273. **Kipperman A. H. M., Vermij C. J.**//Nuovo Cimento. 1969. Vol. B63. P. 29—37.
274. **Tatsuyama C., Hamaguchi C., Tomita H., Nakai J.** //Jap. J. Appl. Phys. 1971. Vol. 10. P. 1698—1703.
275. **Fivaz R., Mooser E.**//Phys. Rev. 1969. Vol. 163. P. 743—749.
276. **Fivaz R., Shmid Ph. E.**// Physics and Chemistry of Materials with Layered Structures/Ed. P. A. Lee. Vol. 4. Optical and Electrical Properties. Lond.: D. Reidel Publ. Comp. 1976. P. 343—348.
277. **Fisher G., Brebner J. L.**//J. Phys. Chem. Sol. 1962. Vol. 23. P. 1363—1374.
278. **Gouskov L., Gouskov A.**//Sol. Stat. Commun. 1978. Vol. 28. P. 99—108.
279. **Fielding P., Fisher G., Mooser E.**//J. Phys. Chem. Sol. 1959. Vol. 8. P. 434—444.
280. **Nishino T., Hamakawa Y.**//Jap. J. Appl. Phys. 1977. Vol. 16. P. 1291—1299.
281. **Damon R. W., Redington R. W.**//Phys. Rev. 1954. Vol. 96. P. 1498—1509.
282. **Sugaike S.**//Mineral J. 1957. Vol. 2. P. 63—72.
283. **Itoga R. S., Kannewurf C. R.**//J. Phys. Chem. Sol. 1971. Vol. 32. P. 1099—1108.
284. **Ikari T., Hashimoto K.**//Phys. Stat. Sol. (a), 1975. Vol. 31. P. K115—K117.
285. **Makita Y., Kobayashi K., Kanada M., Kawai T.**// J. Phys. Soc. Jap. 1968. Vol. 25. P. 816—824.
286. **Kobayashi K., Kawai T., Kanada M.**//Ibid. 1967. Vol. 23. P. 305—309.
287. **Kawai T., Kabayashi K., Kurita M., Makita Y.**// Ibid. 1971. Vol. 30. P. 1101—1105.
288. **Физико-химические** свойства полупроводниковых веществ. Справочник. М.: Наука. 1979.
289. **Берченко Н. Н., Кревс В. Е., Средин В. Г.** Полупроводниковые твердые растворы и их применение. М.: Воениздат. 1982.
290. **Landolt-Bornstein.** Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology/Ed. O. Madelung. Berlin: Springer-Vergal. 1982. Vol. 17. Subvol. b
291. **Конуэлл Э.** Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях: Пер. с англ./Под ред. И. Б. Левинсона и Ю. К. Пожелы. М.: Мир. 1970.
292. **Landolt-Bornstein.** Numerical Data and Functional Relationship in Science and Technology/Ed. O. Madelung. Berlin: Springer-Verlag. 1982. Vol. 17. Subvol. a.
293. **Landolt-Bornstein.** Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technolgy//Ed. O. Madelung, Berlin: Springer-Verlag. 1983. Vol. 17. Subvol. e.
294. **Landolt-Bornstein.** Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology/Ed. O. Madelung, Berlin: Springer-Verlag. 1983. Vol. 17. Subvol. f.
295. **Kamath G. S.**//Mater. Res. Bull. 1969. Vol. 4. P. S57—S59.
296. **Van Daal H. J., Knippenberg W. F., Wasscher J. D.**//J. Phys. Chem. Sol. 1963. Vol. 24. P. 109—114.
297. **Nimtz G., Schlicht B.**//Springer Tracts in Modern Physics. Berlin: Springer-Verlag. 1983. Vol. 98.
298. **Van den Dries J., Lieth R.** Phys. Stat. Sol. (a). 1971. Vol. 5. P. K.171—K173.
299. **Stourac L., Zavetova M., Abraham A.**//Proc. 12th Intern. Conf. Phys. Semicond., Stuttgart, Teubner 1974. P. 621—628.
300. **Stanchev A., Vodenicharov C.**//Thin Solid Films. 1976. Vol. 38. P. 67—78.
301. **Asanabe S., Okazaki A.**//J. Phys Soc. Jap. 1960. Vol. 15. P. 989—993.
302. **Kyriakos D. S., Valassiades O., Economou N. A.**// Instrum. Phys. Conf. 1979. Ser. 43, chapt. 8.
303. **Анисимов Б. Б., Габедова А. А., Джамагидзе Ш. З.**//Изв. АН СССР. Сер. неорган. матер. 1978. Т. 14. С. 1417—1422.
304. **Bahl S. K., Chopra K. L.**//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 2196—2199.
305. **Yabumoto T.**//J. Phys. Soc. Jap. 1958. Vol. 13. P. 972—983.
306. **Albers W., Haas C., Vink H. e. a.**//J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32. P. 2220—2225.
307. **Umeda J.**//J. Phys. Soc. Jap. 1961. Vol. 16. P. 124—128.
308. **Maier H., Daniel D. R.**//J. Electron. Mater. 1977. Vol. 6. P. 693—698.
309. **Sagar A., Miller R. C.**//Proc. Intern. Conf. Phys. Semicind. Exeter. July 1962/Ed. A. C. Stickland. 1962. P. 653—659.
310. **Allgaier R. S., Houston B.**//Phys. Rev. 1972. Vol. B5. P. 2186—2189.
311. **Fonstad C. G., Rediker R. H.**//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. J. 2911—2923.
312. **Gowers J. P., Lee P. A.**//Sol. Stat. Commun. 1970. Vol. 8. P. 1447—1453.
313. Козлов С. Ф. Дис. ...докт. физ.-мат. наук. М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова. 1985.

Глава 23
ДИЭЛЕКТРИКИ

А. П. Гелле

23.1. Общие сведения

Диэлектриками называют вещества, основным электрическим свойством которых является способность к поляризации и в которых возможно существование электростатического поля. Такое поле может длительно сохраняться лишь в средах, плохо проводящих электрический ток. Электропроводность — способность проводить электрический ток — обусловлена наличием в веществе свободных носителей заряда — электрически заряженных частиц, которые под действием внешнего электрического поля направленно перемещаются сквозь толщу материала, создавая ток проводимости (положительно заряженные носители движутся по направлению вектора напряженности электрического поля E, отрицательно заряженные — против). Параметром вещества, количественно определяющим его электропроводность, является удельная электрическая проводимость γ, См/м, а также удельное объемное электрическое сопротивление $\rho = 1/\gamma$, Ом·м, причем

$$\gamma = nqu,$$

где n — концентрация носителей заряда, м$^{-3}$; q — электрический заряд носителя, Кл; u — подвижность носителя, м^2/(В·с); ($u = v/E$, где v — скорость направленного движения носителя, м/с, в электрическом поле с напряженностью E, В/м). Носителями заряда в диэлектриках могут быть ионы, электроны и молионы — заряженные коллоидные частицы. Плотность тока проводимости (А/м^2) $j = \gamma E$. Идеальный диэлектрик, не существующий в действительности, не содержит свободных носителей и поэтому не способен проводить электрический ток: у него γ и j равны нулю, а ρ бесконечно велико. У реальных диэлектриков $\rho = 10^7 \div 10^{18}$ Ом·м, их удельная проводимость вследствие малой концентрации носителей так мала, что их считают практически не проводящими ток материалами. Между диэлектриками и полупроводниками нет точной границы, так что нижнее значение диапазона величин ρ диэлектриков условно.

Помимо удельного объемного сопротивления, для краткости обычно называемого удельным сопротивлением, применительно к твердым диэлектрикам в качестве параметра введено удельное поверхностное сопротивление ρ_s, Ом, имеющее важное значение при выборе материала для работы в увлажненных и загрязненных средах.

При повышении электрического напряжения, приложенного к образцу диэлектрика, он остается практически непроводящим (сохраняет высокое ρ) до тех пор, пока под действием сил электрического поля в диэлектрике не образуется канал с высокой электропроводностью, что приводит практически к короткому замыканию между электродами, т. е. к пробою диэлектрика. Минимальное напряжение, приложенное к образцу диэлектрика и вызывающее его пробой, называют пробивным напряжением $U_{пр}$. Поскольку образцы одного и того же диэлектрика различной толщины пробиваются при разных напряжениях, величина $U_{пр}$ не может характеризовать стойкость материала к пробою. Параметром диэлектрического материала, определяющим его способность противостоять пробою, является электрическая прочность $E_{пр}$ — напряженность электрического поля в диэлектрике, при достижении которой происходит его пробой. Определяется эта характеристика так:

$$E_{пр} = U_{пр}/d,$$

где d — толщина образца диэлектрика в месте пробоя. Величину $E_{пр}$ принято выражать в мегавольтах на метр (МВ/м). В практике электрическую прочность удобно оценивать в киловольтах на миллиметр (1 кВ/мм = = 1 МВ/м).

Механизм пробоя диэлектриков может иметь различный характер. Основными видами пробоя твердых диэлектриков являются электрический и тепловой. Электрический пробой представляет собой разрушение диэлектрика силами электрического поля и сопровождается образованием электронных лавин. Тепловой пробой обусловлен нагревом диэлектрика до критической температуры вследствие диэлектрических потерь при нарушении в диэлектрике теплового равновесия. Значение $E_{пр}$ при электрическом пробое составляет примерно 100—1000 МВ/м, а при тепловом — 1—10 МВ/м.

К электрическим параметрам диэлектриков относится диэлектрическая проницаемость, характеризующая способность материала создавать электрическую емкость. В СИ различают относительную диэлектрическую проницаемость ε_r (прежде ε), величину безразмерную, и абсолютную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_r\varepsilon_0$, Ф/м ($\varepsilon_0$ — электрическая постоянная, по старой терминологии — диэлектрическая проницаемость вакуума, равная $8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Диэлектрики, в силу того, что свободных носителей заряда в них мало, состоят по сути из связанных заряженных частиц: положительно заряженных ядер и обращающихся вокруг них электронов в атомах, молекулах и ионах, а также упруго связанных разноименных ионов, расположенных в узлах решетки ионных кристаллов. Поляризация диэлектриков — упорядоченное смещение связанных зарядов под действием внешнего электрического поля (положительные заряды смещаются по направлению вектора напряженности поля E, а отрицательные — против него). Смещение l невелико и прекращается, когда сила электрического поля, вызывающая движение зарядов относительно друг друга, уравновешивается силой взаимодействия между ними. В результате поляризации каждая молекула или иная частица диэлектрика становится электрическим диполем — системой двух связанных одинаковых по значению и противоположных по знаку зарядов q, Кл, расположенных на расстоянии l, м, друг от друга, причем q — это либо заряд иона в узле кристаллической решетки, либо эквивалентный заряд системы всех положительных или системы всех отрицательных зарядов поляризующейся частицы. Считают, что в результате процесса поляризации в частице индуцируется электрический момент $p = ql$, Кл·м. У линейных диэлектриков (их большинство) между индуцируемым моментом и напряженностью электрического поля E, действующей на частицу, существует прямая пропорциональность: $p = \alpha E$. Коэффициент пропорциональности α, Ф·м^2, называют *поляризуемостью* данной частицы. Количественно интенсивность поляризации определяется поляризованностью P диэлектрика, которая равна сумме индуцированных электрических моментов всех N поляризованных частиц, находящихся в единице объема вещества:

$$P = pN \text{ или } P = \alpha NE,$$

где P — в Кл/м^2; N — в м$^{-3}$; E — в В/м. Следовательно, чем больше поляризуемость отдельной частицы α и выше концентрация частиц N, т. е. чем больше произведение αN, тем интенсивнее процесс поляризации. Из уравнения, связывающего P и ε_r, следует:

$$\varepsilon_r = 1 + N\alpha/\varepsilon_0.$$

(Эта формула пригодна для газообразных, но в ряде случаев с бо́льшим или меньшим приближением может быть применена также для жидких и твердых диэлектриков.) Таким образом, по физическому смыслу диэлектрическая проницаемость — количественная мера интенсивности процесса поляризации диэлектриков. Концентрация N поляризующихся частиц невелика в газах и намного выше в жидких и твердых диэлектриках. Поляризуемость частицы α зависит от механизма поляризации, определяемого природой диэлектрика.

Основными видами поляризацни являются электронная. ионная и дипольная.

Электронная поляризация — упругое смещение электронных орбит относительно ядер в атомах, молекулах и ионах под действием внешнего электрического поля. Таким образом, электронная поляризация происходит во всех диэлектриках независимо от существования в них других видов поляризации. Это быстрая поляризация, совершающаяся за время порядка 10^{-14}—10^{-15} с, сравнимое с периодом световых колебаний. В неполярных диэлектриках существует только электронная поляризация и поэтому $\alpha=\alpha_э$ (электронная поляризуемость). Неполярные молекулы имеют симметричное строение и поэтому центры тяжести эквивалентных положительного и отрицательного зарядов у них совпадают, так что в отсутствие внешнего поля неполярные молекулы не имеют собственного электрического момента ($\mu=0$).

Ионная поляризация — упругое смещение противоположно заряженных ионов в узлах кристаллической решетки ионных кристаллов под действнем внешнего поля. Это тоже быстрый вид поляризации, устанавливающийся за время порядка 10^{-12}—10^{-13} с, Поскольку в ионных кристаллах существует еще и электронная поляризация, $\alpha=\alpha_э+\alpha_и$ ($\alpha_и$ — ионная поляризуемость) и такие диэлектрики отличаются бо́льшим значением ε_r, чем неполярные.

Быстрые виды поляризации происходят без потерь энергии.

Дипольная поляризация характерна для полярных диэлектриков. Полярные молекулы имеют несимметричное строение. Центры тяжести эквивалеитных разноименных зарядов у них не совпадают, и поэтому в отсутствие внешнего поля эти молекулы обладают собственным электрическим моментом $\mu\neq 0$, т. е. являются жесткими (постоянными) диполямн. Сущность дипольной поляризации состоит в повороте (ориентацни) этих жестких диполей в направленин электрического поля. Поскольку в полярной молекуле существует также и электронная поляризация, $\alpha=\alpha_э+\alpha_д$, где $\alpha_д$ — дипольная поляризуемость, и поэтому полярные диэлектрики имеют ε_r больше, чем неполярные. Дипольная поляризация относится к замедленным (релаксационным) видам поляризации. Для ее завершения требуется время порядка 10^{-2}—10^{-10} с. Поляризации релаксационного вида запаздывают во времени от изменения вызывающего их внешнего электрического поля и сопровождаются потерямн энергии.

К замедленным видам относится ионно-релаксационная поляризация, происходящая в неорганических стеклах и кристаллах с неплотной упаковкой ионов, и миграционная, свойственная твердым диэлектрикам прн наличии макроскопических неоднородностей.

Нелинейным диэлектрикам — сегнетоэлектрикам наряду с электронной и ионной свойственна спонтанная (самопроизвольная) поляризация, относящаяся к числу релаксационных видов. Спонтанная поляризация возникает в определенном температурном интервале, ограниченном сегнетоэлектрическими точками Кюри, под влиянием внутренних процессов самопроизвольно. При этом структура элементарной ячейки кристалла становится несимметричной, приобретая электрнческий момент. В пределах небольших областей (доменов) электрические моменты соседнх элементарных ячеек сориентированы параллельно, так что домен самопроизвольно весьма интенсивно поляризуется. Соседние домены поляризуются в различных направлениях, и первоначально поляризованность P образца материала в целом равна нулю. При воздействии внешнего электрического поля векторы поляризованности доменов ориентируются параллельно и весь образец оказывается интенсивно поляризованным в одном направлении. Значение ε_r у сегнетоэлектриков может доходить вблизи точки Кюрн до 10^6.

В диэлектрике, находящемся в электрическом поле, происходит рассеяние (диссипация) энергии. Рассеиваемую за одну секунду энергию (мощность) называют *диэлектрическими потерями.* Теряемая энергия преобразуется в теплоту, вызывая нагрев диэлектрика, вследствие чего ухудшаются электрические и другие важные его характеристики. Потери в диэлектриках наблюдаются как при переменном, так и при постоянном напряжении, однако под диэлектрическими потерями понимают мощность, рассеиваемую в переменном электрическом поле. Вектор тока в образце диэлектрика, включенном под переменное напряжение, опережает по фазе вектор напряжения на угол $\varphi<90°$. Угол δ, дополняющий φ до 90°, называют *углом диэлектрических потерь.* В идеальном диэлектрике без потерь $\varphi=90°$ и $\delta=0$. В качестве параметра диэлектрика используется $\operatorname{tg}\delta$ — *тангенс угла диэлектрических потерь.*

Полные диэлектрические потери в образце диэлектрика емкостью C, включенном под переменное напряжение U с угловой частотой ω,

$$P = U^2\omega C \operatorname{tg}\delta,$$

где P — в Вт; U (действующее значение) — в В; $\omega=2\pi f$, f — в Гц; C — в Ф.

Для оценки потерь в любой точке образца диэлектрика с известным значением напряженности электрического поля E удобно определять удельные диэлектрические потери:

$$p = E^2\frac{f\varepsilon_r \operatorname{tg}\delta}{1{,}8\cdot 10^{10}},$$

где p — в Вт/м^3; E — в В/м; f — в Гц. Величина $\gamma_a = f\varepsilon_r\operatorname{tg}\delta/(1{,}8\cdot 10^{10})$ — удельная активная проводимость диэлектрика, См/м, с параметрами ε_r и $\operatorname{tg}\delta$, работающего на переменном напряжении при частоте f, Гц. Способность диэлектрика создавать диэлектрические потери в переменном поле характеризуется произведеннем $\varepsilon_r\operatorname{tg}\delta$, называемым *коэффициентом диэлектрических потерь.*

Удельные потери диэлектрика в постоянном электрическом поле определяются только током проводимости:

$$p_{пост} = E^2\gamma.$$

Здесь $p_{пост}$ — в Вт/м^3; E — в В/м; удельная проводимость γ — в См/м.

В переменном электрическом поле различают три главных вида диэлектрических потерь:

1) потери на электропроводность — возникают во всех диэлектриках;

2) релаксационные потери — обусловлены замедленными видами поляризации;

3) ионизационные потери — свойственные газообразным диэлектрикам, а также жидким и твердым при наличии в них воздушных или иных газовых включений.

Электрические параметры диэлектриков не являются физическими константами и могут зависеть от многих внешних факторов (температура, частота изменения электрического поля, влажность окружающей среды и др.).

Важное для практики значение имеют и неэлектрические свойства диэлектриков: механические, тепловые

(в том числе нагревостойкость и холодостойкость), физико-химические, радиационные и др.

В большинстве случаев практики применяются пассивные диэлектрики (электрическая изоляция, диэлектрические волноводы, электрические конденсаторы). В последнее время широкое распространение получили активные (управляемые) диэлектрики, резко изменяющие свои свойства под действием внешних (управляющих) факторов (сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты и др.).

Поведение диэлектриков в электрическом поле, зависимость их характеристик от различных факторов рассмотрены в монографиях и пособиях [1—7, 9], свойства представлены в справочной литературе [9—12], методы определения электрических и неэлектрических характеристик диэлектриков — в [8, 9].

23.2. Газообразные диэлектрики

Газы в обычных условиях характеризуются высоким удельным сопротивлением и очень малыми диэлектрическими потерями. К достоинствам газов относятся также восстановление электроизоляционных свойств после пробоя и отсутствие старения (ухудшение свойств со временем). Недостатком их является невысокая (по сравнению с жидкими и твердыми диэлектриками) электрическая прочность при нормальном давлении. Для увеличения электрической прочности используют как повышение давления газов, так и глубокое их разрежение. Повысить электрическую прочность газовой изоляции можно также, применяя электроотрицательные газы. Молекулы этих газов, содержащие обычно атомы фтора, хлора и других галогенов, способны захватывать свободные электроны и становиться малоподвижными отрицательными ионами. Удаление подвижных электронов затрудняет развитие электрического разряда, вследствие чего электрическая прочность газа возрастает.

Важнейшим для электротехнической практики газообразным диэлектриком является воздух, особенно при близких к нормальным атмосферным условиях. В табл. 23.1 приведены свойства некоторых газов в сравнении с воздухом (соответствующие параметры воздуха приняты за единицу).

Диэлектрическая проницаемость газов вследствие их малой плотности (т. е. концентрации N молекул — поляризующихся частиц) мало отличается от единицы. Значения ε_r различных газов приведены в табл. 23.2. С ростом давления (при постоянной температуре) ε_r газов растет ввиду увеличения концентрации поляризующихся частиц. Значения ε_r для некоторых газов при различных давлениях приведены в табл. 23.3.

Газы в слабых электрических полях и при не очень высоких температурах обладают весьма малой удельной проводимостью. При этих условиях весьма немногочисленные свободные носители заряда — электроны и ионы — образуются лишь под действием внешних ионизаторов невысокой интенсивности — космических лучей и естественного ионизирующего излучения. Поэтому при указанных условиях газы являются отличными диэлектриками с удельным сопротивлением порядка 10^{18} Ом·м, практически не имеющим диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$ порядка 10^{-8}). Повышение электропроводности газов происходит при высоких температурах, начиная с 10^3—10^4 К, когда энергия теплового движения частиц газа велика и при столкновении они могут ионизовать друг друга (происходит термическая ионизация). Термоионизация воздуха нарастает, начиная с температуры 8000 К. При 20 000 К воздух ионизуется практически полностью [7]. Процесс термоионизации играет определяющую роль в хорошо проводящем ток канале электрической дуги, температура которого составляет 4000—15 000 К.

В основе механизма пробоя газов лежит процесс ударной ионизации, обусловленный свободными электронами, которые, будучи разогнаны в электрическом поле, ионизуют при соударении нейтральные молекулы газа. Развитию пробоя способствует также фотоионизация, обусловленная фотонами, которые испускают возбужденные при соударении с электронами молекулы газа, переходя из возбужденного состояния в нормальное.

Развитие пробоя зависит от степени однородности электрического поля, в котором происходит пробой газа. Если в однородном поле напряженность поля постоянна, а в слабонеоднородном поле изменяется вдоль силовой линии не более чем в 2—3 раза, то в резконеоднородном — на несколько порядков.

В однородном поле пробой наступает практически мгновенно по достижении определенного напряжения $U_{пр}$. Между электродами возникает искра, которая при достаточной мощности источника напряжения может перейти в электрическую дугу. Для газов установлен закон Пашена: при неизменной температуре пробивное напряжение газа зависит от произведения его давления p на расстояние d между электродами: $U_{пр}=f(pd)$. На рис. 23.1 эта зависимость представлена для воздуха и водорода. Для каждого газа характерно существование минимального значения пробивного напряжения при определенном значении pd (для воздуха 327 В при pd=665 Па·мм). Минимальное пробивное напряжение некоторых других газов, В: аргон 195; водород 280; углекислый газ 420. Если иметь в виду пробой на переменном напряжении, то приведенные данные относятся к амплитудным значениям. Как видно из рис. 23.1, при давлении, близком к нормальному (0,1 МПа), и реальных межэлектродных расстояниях произведение pd таково, что рабочая точка для воздуха находится на правой ветви кривой Пашена. Поэтому с увеличением p или d $U_{пр}$ растет, а при уменьшении их — снижается. Левая ветвь соответствует разреженным газам, так как межэлектродные расстояния порядка 0,001 мм при атмосферном давлении на практике не применяются. Для повышения $U_{пр}$ газовых промежутков используют как повышение давления (обычно до 1,5 МПа), так и глубокое разрежение газа (вакуум). При значительном снижении давления газа (левая ветвь кривой Пашена) $U_{пр}$ растет из-за затруднения образования газового разряда вследствие малой вероятности столкновения заряженных частиц с молекулами. Но рост не беспределен: при давлениях порядка 10^{-1}—10^{-2} Па (10^{-3}—10^{-4} мм рт. ст.) газовый разряд переходит в вакуумный. Вакуумный же пробой обусловлен процессами на электродах, и поэтому $U_{пр}$ в вакууме зависит от материала и состояния поверхности электродов [13, 14].

Даже в однородном поле при неизменных давлении и температуре электрическая прочность газа не остается неизменной. При малых межэлектродных расстояниях

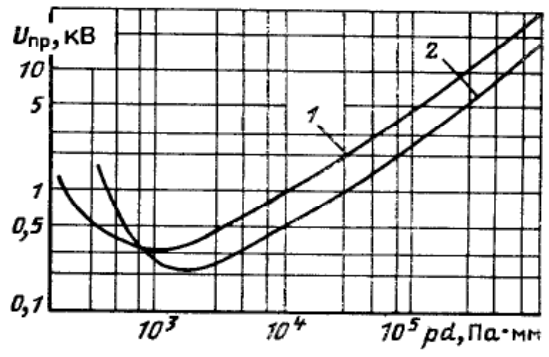


Рис. 23.1. Зависимость $U_{пр}$ воздуха (*1*) и водорода (*2*) от произведения давления p на расстояние между электродами d [9]

из-за затруднения в образовании электронных лавин $E_{пр}$ существенно возрастает. В табл. 23.4 приведены значения $E_{пр}$ воздуха при нормальных условиях при изменении d в пределах от 0,006 до 1 см.

В слабонеоднородном поле, как и в однородном, пробой газового промежутка происходит сразу при возрастании приложенного напряжения до $U_{пр}$. Особенностью пробоя газа в резконеоднородном поле является возникновение при сравнительно низком напряжении коронного разряда (короны) в области с повышенной напряженностью электрического поля (вблизи электрода с малым радиусом кривизны), а пробой промежутка происходит при более высоком напряжении, так что пробой газа в резконеоднородном поле характеризуется двумя значениями напряжений: начальным (коронным) $U_к$ и более высоким пробивным $U_{пр}$.

В неоднородном поле пробивное напряжение газа при том же расстоянии между электродами тем ниже, чем больше степень неоднородности поля. Поэтому в однородном поле $U_{пр}$ газа максимально. Наименьшее значение $U_{пр}$ имеет газовый промежуток между электродами стержень — плоскость, между которыми создается электрическое поле с наиболее высокой степенью неоднородности. На рис. 23.2 и 23.3 приведены зависимости $U_{пр}$ воздушного промежутка от расстояния между электродами для однородного и резконеоднородных полей.

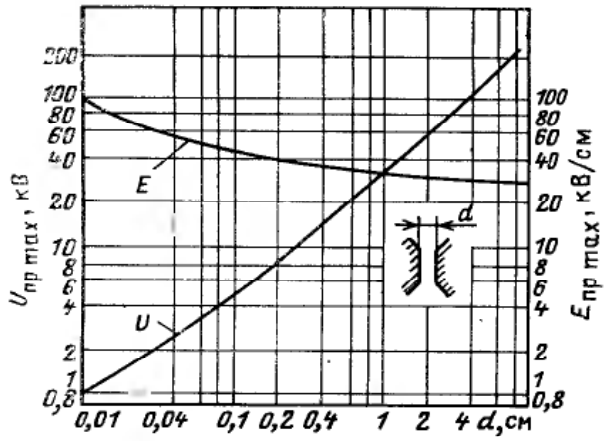


Рис. 23.2. Зависимость $U_{пр}$ и $E_{пр}$ (в амплитудных значениях) в однородном поле от расстояния между электродами в воздухе при частоте 50 Гц, температуре 20°С и давлении 0,1 МПа [15]

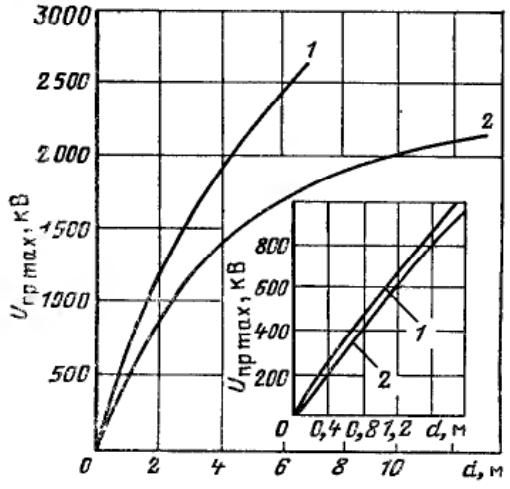


Рис. 23.3. Зависимость амплитудных значений $U_{пр}$ воздушного промежутка от расстояния между электродами стержень—стержень (*1*) и стержень—плоскость (*2*) при частоте 50 Гц, температуре 20°С и давлении 0,1 МПа [16]

В несимметричных электрических полях, которые создаются либо между электродами неодинаковой формы, либо между одинаковыми электродами при заземлении одного из них (при этом симметрия поля нарушается влиянием земли и других заземленных предметов), при пробое газового промежутка на постоянном напряжении характерно существенное влияние на $U_{пр}$ полярности электродов (рис. 23.4). Этот эффект обусловлен влиянием положительного объемного заряда, образующегося вблизи электрода с меньшим радиусом кривизны (у незаземленного электрода при одинаковой их форме).

Пробой газа при высоких частотах отличается своеобразием. На рис. 23.5 приведена зависимость пробив-

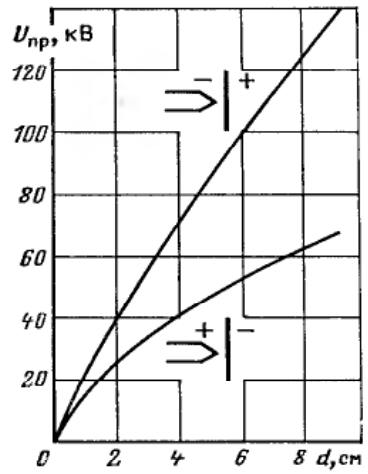


Рис. 23.4. Зависимость $U_{пр}$ воздушного промежутка от расстояния между электродами стержень — плоскость при различной их полярности [17]

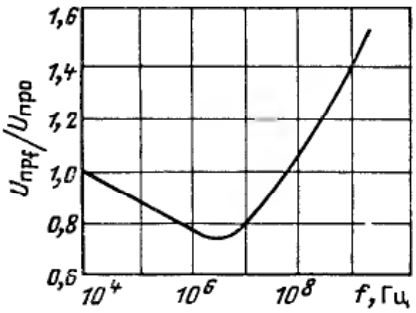


Рис. 23.5. Зависимость отношения пробивного напряжения воздуха при нормальных условиях в однородном поле от частоты f к пробивному напряжению при постоянном токе [9]

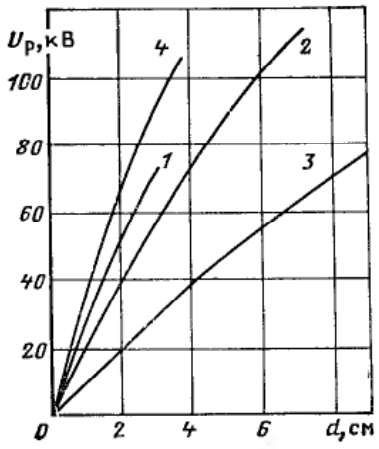


Рис. 23.6. Зависимость амплитуды разрядного напряжения в воздухе вдоль различных изоляционных цилиндров диаметром 50 мм в однородном поле при частоте 50 Гц от длины промежутка (высоты цилиндра) d:

1 — парафин; *2* — стекло; *3* — стекло при неплотном контакте с электродами; *4* — чисто воздушный промежуток [18]

ного напряжения воздуха в однородном электрическом поле при давлении 0,1 МПа от частоты (рассматривается отношение $U_{прf}$ при частоте f к $U_{про}$ в постоянном электрическом поле). При частотах до 10^4 Гц пробивное напряжение от частоты не зависит, а с дальнейшим ростом частоты постепенно снижается, проходя через минимум в области частот 10^6—10^7 Гц. Спад объясняется образованием в разрядном промежутке объемного заряда, облегчающего пробой. При последующем возрастании частоты $U_{пр}$ резко увеличивается. Это обусловлено тем, что с уменьшением времени полупериода при высоких частотах для накопления электронами достаточной для ионизации молекул энергии требуется существенное увеличение приложенного напряжения.

Разряд в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика называют *поверхностным разрядом* или *поверхностным перекрытием*. Внесение твердого диэлектрика в воздушный промежуток существенно снижает его разрядное напряжение, даже если цилиндрический образец поместить между параллельными пластинами, создающими в промежутке однородное поле. Хотя в этом случае образующие цилиндра совпадают с направлением силовых линий электрического поля и поэтому поле, казалось бы, должно оставаться однородным, разряд всегда развивается в воздухе вдоль поверхности твердого диэлектрика при более низком напряжении, чем в чисто воздушном промежутке без цилиндра из твердого диэлектрика. На рис. 23.6 приведены зависимости напряжения поверхностного разряда в воздухе вдоль изоляционных цилиндров из различных твердых диэлектриков при частоте 50 Гц от высоты цилиндра (длины разрядного промежутка). Снижение разрядного напряжения обусловлено нарушением однородности электрического поля, так как пленка влаги на поверхности диэлектрического цилиндра имеет неодинаковую толщину в различных участах вдоль длины образца, в результате чего напряжение вдоль цилиндра распределяется неравномерно. Поэтому гидрофобный (несмачивающийся) парафин в меньшей степени снижает разрядное напряжение по сравнению с чисто воздушным промежутком, чем гидрофильный (смачивающийся) фарфор или стекло. При

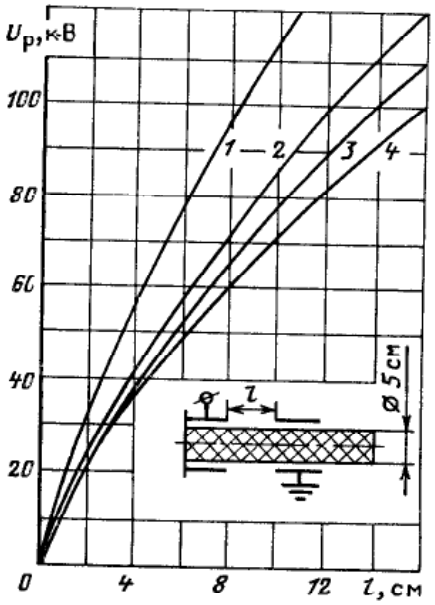


Рис. 23.7. Зависимость амплитудного разрядного напряжения в воздухе от расстояния между электродами по поверхности твердых диэлектриков в неоднородном поле при частоте 50 Гц:

1 — чисто воздушный промежуток; *2* — парафин; *3* — бакелит; *4* — фарфор и стекло [18]

тщательном просушивании гидрофильных материалов их напряжение поверхностного перекрытия можно поднять практически до разрядного напряжения чисто воздушного промежутка.

Напряжение перекрытия в неоднородном поле существенно ниже, чем в однородном, причем гигроскопические свойства твердого диэлектрика влияют меньше (рис. 23.7), так как в неоднородном поле воздействие пленки влаги на форму электрического поля не столь заметно.

Сжиженные газы обладают высокими электроизоляционными свойствами: их ε_r немногим более единицы, а

Таблица 23.1. **Свойства газов по отношению к свойствам воздуха** [9]

Характеристика	Азот	Углекислый газ	Водород	Элегаз
Плотность	0,97	1,52	0,07	5,19
Теплопроводность	1,08	0,64	6,69	0,70
Удельная теплоемкость	1,05	0,85	14,35	0,59
Электрическая прочность	1,00	0,90	0,60	2,3

Таблица 23.2. **Диэлектрическая проницаемость газов при температуре 20°С и давлении 0,1 МПа при различных частотах** [9]

Газ	ε_r при низких частотах	ε_r при длине волны 30 мм
Гелий	1,000072	—
Водород	1,00027	1,00036
Кислород	1,00055	1,00053
Аргон	1,00056	—
Азот	1,00058	1,00059
Углекислый газ	1,00096	1,00099
Элегаз	1,00191	—
Воздух	1,00058	1,00058

Таблица 23.3. **Диэлектрическая проницаемость ε_r газов при различном давлении** [9]

Газ	0,1 МПа	2 МПа	4 МПа	10 МПа
Воздух (при 19°С)	1,00058	1,0109	1,0218	1,0549
Азот (при 20°С)	1,00058	1,0109	—	1,055
Углекислый газ (при 15°С)	1,00098	1,020	1,050	—

Таблица 23.4. **Электрическая прочность воздуха в однородном электрическом поле при 20°С и давлении 0,1 МПа при различном межэлектродном расстоянии** [2]

d, см	0,006	0,008	0,01	0,02	0,04	0,06	0,1	0,4	1,0
$E_{пр}$, МВ/м	12,5	10,7	9,7	7,4	5,9	5,3	4,5	3,6	3,1

электрическая прочность составляет 30—35 МВ/м [19]. Некоторые свойства сжиженных газов приведены в табл. 23.5.

Таблица 23.5. **Свойства сжиженных газов** [20]

Характеристика	Азот	Кислород	Водород	Неон	Гелий
Температура кипения, К	77,4	90,2	20,4	27,2	4,2
Диэлектрическая проницаемость ε_r	1,431	1.48	1.231	—	1,047

23.3. Жидкие диэлектрики

Жидкости легко загрязняются и трудно очищаются. Поэтому на практике применяют технически чистые жидкие диэлектрики, содержащие примеси как попадающие извне, так и образующиеся в результате процесса старения. Такие материалы характеризуются *ионной* и *молионной электропроводностью*. Ионная обусловлена диссоциацией молекул самой жидкости (*собственная электропроводность*) и примесей (*примесная электропроводность*). Для неполярных жидкостей характерна примесная электропроводность. Полярные же отличаются повышенной удельной проводимостью из-за наличия обоих видов ионной электропроводности, причем возрастание ε_r приводит к росту проводимости, так что сильно полярные жидкости с ε_r более 20 (вода, спирты, кетоны

Таблица 23.6. **Характеристики жидких органических диэлектриков** [9, 10, 23]

Характеристика	Нефтяные масла				
	трансформаторное	конденсаторное	кабельные		
			МН-2	С-220	П-28
Температура застывания, °С (не выше)	—45	—45	—45	—30	—10
Температура вспышки, °С (не ниже)	135	135	135	180	240
Вязкость кинематическая при 20°С, 10^{-6} м²/с	17—26	30—45	37	800	2000
ρ при 20°С, Ом·м	10^{11}—10^{12}	10^{12}—10^{13}	10^{12}—10^{13}	10^{13}—10^{14}	10^{11}—10^{12}
ε_r при 20°С	2,1—2,4	2,1—2,3	2,2—2,3	2,1—2,2	2,2—2,4
tg δ при 50 Гц и 20°С	0,0005—0,002	—	—	—	—
То же при 100°С	—	$\leqslant$0,005	0,003	0,003	0,025
$E_{пр}$ при 50 Гц и 20°С, МВ/м	12—26	20—25	18—20	20—24	14—18

Продолжение табл. 23.6

Характеристика	Касторовое масло	Октол	Дибутилсебацинат	Вазелин конденсаторный нефтяной
Температура застывания, °С (не выше)	—15 ÷ 17	—12	—8	t каплепадения 37° С
Температура вспышки, °С (не ниже)		165	180	—
Вязкость кинематическая при 20°С, 10^{-6} м²/с	130 (при 50° С)	100 (при 100° С)		—
ρ при 20°С, Ом·м	10^{8}—10^{11}	10^{12}	10^{8}—10^{9} (при 50° С)	10^{12}—10^{13}
ε_r при 20°С	4,0—4,5	2,2—2,4	4,2—4,3	3,8—4,0
tg δ при 50 Гц и 20°С	0,02	0,0012	0,80 (при 1 кГц и 50°С)	0,0002 (при 1 кГц)
То же при 100°С	—	—	—	—
$E_{пр}$ при 50 Гц и 20°С, МВ/м	14—16	16—17	16	20—22

Примечания: 1. Дибутилсебацинат применяется в конденсаторостроении. 2. Вазелин — полужидкий материал. 3. Температура вспышки — температура вспышки паров жидкости в смеси с воздухом, определяемая по стандартной методике.

Таблица 23.7. **Характеристики хлорированных жидких диэлектриков** [9]

Характеристика	Трихлордифенил	Совол	ГХБД (гексахлорбутадиен)	Трихлорбензол (ТХБ)	Совтол-10 (90 % совола + 10 % ТХБ)	Гексол (20 % совола + 80 % ГХБД)
Температура застывания, °С	—18	5	—21	—16	—7	—60
Температура начала кипения при 0,1 МПа, °С	320	350	212	215	221	215
Вязкость кинематическая при 20° С, 10^{-6} м²/с	126	1800	2	1,5	650	4
ρ при 90° С, Ом·м	$>3\cdot10^{9}$	$>5\cdot10^{9}$	$>5\cdot10^{10}$	$>7\cdot10^{8}$	$>8\cdot10^{8}$	$>1,3\cdot10^{10}$
ε_r при 90° С	4,5	4,1	2,3	3,3	4,3	2,7
tg δ при 50 Гц и 90° С	$<$0,025	$<$0,015	$<$0,003	$<$0,150	$<$0,100	$<$0,010
$E_{пр}$, МВ/м, не менее	20 при 65° С	20 при 65° С	20 при 20° С	16 при 20° С	20 при 65° С	24 при 20° С

Таблица 23.8. **Характеристики кремнийорганических жидких диэлектриков** [9, 23]

Характеристика	ПМСЖ			ПЭСЖ		ПМФСЖ		ПХ(Ф)ОСЖ	
	ПМС-10	ПМС-20	ПМС-50	ПЭС-Д	№ 3	ФМ-5	ФМ-1322	ФС-5	ФС-56
Температура застывания, °С	—60	—60	—60	—60	—70	—110	—70	—100	—90
Температура вспышки, °С	170	180	200	150	125	200	200	200	300
Вязкость кинематическая при 20° С, 10^{-6} м²/с	10	20	50	80—180	15	15,7	24,5	18	720
tg δ при 20° С	0,0008—0,0010			0,0003	—	0,0020	0,0016	0,0200	—
ρ при 20° С, Ом·м	10^{12}			$2 \cdot 10^{12}$	10^{11}	10^{11}	10^{11}	$5 \cdot 10^{10}$	—
ε_r при 20° С	2,6—2,7			2,4—2,8	—	2,8	2,7	5,4	6,3

Примечание. ПМСЖ — полиметилсилоксановые жидкости; ПЭСЖ — полиэтилсилоксановые жидкости; ПМФСЖ — полиметилфенилсилоксановые жидкости; ПХ(Ф)ОСЖ — полихлор(фтор)органосилоксановые жидкости.

Таблица 23.9. **Характеристики фторорганических жидких диэлектриков** [9, 23]

Наименование	Температура, °С		$E_{пр}$ при 60 Гц и 25° С, МВ/м		ε_r при 25° С и 100 Гц	tg δ, 10^{-4} при 25° С и 100 Гц	ρ при 25° С, Ом·м
	кипения	замерзания	жидкости	пара при 0,1 МПа			
Фреон-114	3,6	—94	19,3	9,8	2,26	1	10^{14}—10^{15} при 0° С
Фреон-113	47,6	—35	12,2	11,0	2,41	1	10^{14}
Фреон-215	74,0	—80	12,6	12,6	2,76	6	10^{13}
Фреон-212	92,8	23,8	12,6	—	2,52	2	10^{12}
Фреон-214	114,0	—92,8	11,8	13,0	2,78	2	10^{11}

Таблица 23.10. **Электрические характеристики жидких диэлектриков высокой степени чистоты при 20° С** [22, 23]

Название жидкостей	ε_r	$E_{пр}$, МВ/м
н-Гексан	1,88	86,8
н-Гептан	1,93	84,0
Циклогексан	2,04	83,0
Тетрахлоруглерод	2,24	81,0
Бензол	2,28	78,4
Толуол	2,39	78,6
Тетрахлорэтилен	2,46	77,6
Гексахлорбутадиен	2,55	89,0
Трихлорэтилен	3,44	67,0
1,2,4-Трихлорбензол	3,98	62,0
Диэтилэфир	4,38	58,0
Хлороформ	4,89	54,5
м-Дихлорбензол	4,90	53,8
Бромбензол	5,31	49,9
Хлорбензол	5,54	49,9
1,1, 2,2-Тетрахлорэтан	8,08	35,5
Метиленхлорид	8,56	32,5
орто-Дихлорбензол	9,43	31,2
1,2-Дихлорэтан	10,03	27,5
Паральдегид	15,06	18,2

и т. п.) являются ионными полупроводниками с $\rho = 10^3 \div 10^6$ Ом·м. Молионная электропроводность обусловлена такими носителями, как заряженные коллоидные частицы (молионы) — коллоидная вода, смолистые вещества, мыла и пр.

Примеси ухудшают и другие электрические характеристики жидкостей (tg δ, $E_{пр}$). Относительно менее чувствительна к примесям величина ε_r. Теории пробоя жидких диэлектриков построены в зависимости от типа примесей, определяющих механизм развития пробоя [2, 21, 22].

В табл. 23.6 приведены характеристики некоторых жидких органических природных и синтетических диэлектриков. К природным относятся нефтяные масла: трансформаторное, конденсаторное и кабельные (маловязкое МН-2, С-220 средней вязкости и высоковязкое П-28), а также касторовое масло и конденсаторный вазелин; к синтетическим — полиолефиновая жидкость октол и диэфиры, к которым принадлежит дибутилсебацинат. В табл. 23.7, 23.8 и 23.9 приведены характеристики синтетических жидких диэлектриков на основе хлорированных углеводородов, кремнийорганических и фторорганических соединений. Подробно свойства жидких диэлектриков рассмотрены в [9, 23—26].

Специальной физической и химической очисткой можно довести ρ неполярных жидкостей до 10^{16}—10^{18} Ом·м, а $E_{пр}$ — до 140—260 МВ/м [21]. В табл. 23.10 представлена зависимость электрической прочности $E_{пр}$ от ε_r для высокочистых жидких диэлектриков, применяемых в качестве растворителей и для других целей.

23.4. Твердые диэлектрики

Природные смолы и синтетические полимеры (высокомолекулярные соединения) применяют для получения электроизоляционных лаков, эмалей, компаундов, пластмасс, пленочных, волокнистых и других материалов. Природные смолы и синтетические полимеры бывают термопластичные (после действия нагрева не теряют способности плавиться и растворяться в подходящих растворителях) и термореактивные (после нагрева становятся неплавкими и нерастворимыми). Синтетические полимеры получаются с помощью реакций двух типов:

Таблица 23.11. **Свойства природных смол при 20°С и 50 Гц [9]**

Смола	ρ, Ом · м	ε_r	tg δ	$E_{пр}$, МВ/м	Растворители
Шеллак	10^{13}—10^{14}	3,5	0,01 (0,001*1)	20—30	Этиловый спирт
Канифоль	10^{13}—10^{14}	2,8	0,003	10—15	Жидкие углеводороды, растительные масла, спирт, скипидар
Янтарь	10^{17}	2,8	0,001	—	На холоде не растворяется

*1 После длительного нагрева.

Таблица 23.12. **Характеристики термопластичных полимерных диэлектриков и материалов на их основе при 20 °С [10, 12, 28]**

Наименование	ρ, Ом · м	ε_r	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м
Полиэтилен	10^{15}	2,2—2,3	$(2—6)\cdot10^{-4}$ при 10^6 Гц	25—60
Полипропилен	10^{14}—10^{15}	2,2	$(2—5)\cdot10^{-4}$ при 10^6 Гц	25—40
Полистирол	10^{14}—10^{15}	2,4—2,6	$(2—8)\cdot10^{-4}$ при 10^6 Гц	20—25
Полистирол ударопрочный	10^{13}—10^{14}	2,6—2,7	$(2—3)\cdot10^{-3}$ при 10^6 Гц	23—25
Политетрафторэтилен (фторопласт-4)	10^{15}—10^{18} (до 150 °С)	1,9—2,2	$\leqslant 1\cdot10^{-4}$ (до 10^{10} Гц)	25—27 при $d = 4$ мм
Политрифторхлорэтилен (фторопласт-3)	10^{16}	3,0	$1{,}5\cdot10^{-2}$	13—15 при $d = 4$ мм
Поливинилхлоридный пластикат изоляционный	10^{10}—10^{12}	4—8	$(5—8)\cdot10^{-2}$	20—50
Винипласт (жесткая пластмасса на основе поливинилхлорида)	10^{12}—10^{14}	4,0	0,02	25—60
Полиметилметакрилат (органическое стекло, плексиглас)	10^{10}—10^{11}	3,6	0,06	15—25
Полиформальдегид	10^{12}—10^{13}	3,7	$(3—4)\cdot10^{-3}$	25
Полиэтилентерефталат (лавсан)	10^{13}—10^{14}	3,1—3,2	$(2—3)\cdot10^{-3}$	140—180 (пленка)
Поликарбонат (дифлон)	10^{14}—10^{15}	3,0—3,1	$(2—3)\cdot10^{-3}$	20—25 (у пленки 180)
Полиамиды:				
капрон	10^{11}—10^{12}	4,5	0,06—0,1	20—22
анид (нейлон)	10^{12}—10^{13}	4,6	0,04	20—25
фенилон	10^{12}—10^{13}	4,5	0,02	18—22 (у пленки >100)
Полиимид (полипиромеллитимид)	10^{14}—10^{16}	3,0—4,5	$(1—5)\cdot10^{-3}$	100—300 (пленка)
	10^{10}—10^{12} (при 250 °С)		$(2—6)\cdot10^{-3}$ (при 250 °С)	

Таблица 23.13. **Свойства термореактивных электроизоляционных пластмасс при 20 °С [9—12]**

Марка пластмасс	ρ, Ом · м	ε_r	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	Состав
Э1-340-02; Э2-330-02; Э8-361-63; Э9-342-73; Э10-342-63; Э11-342-63; Э15-121-02	10^{10}—10^{11}	7,5—9,5	0,08	13—20	Связующее — новолачная и резольные фенолформальдегидные смолы (или их модификации); наполнитель — органический, минеральный, их смесь
Э3-340-65; Э4-100-30; Э5-101-30; Э6-014-30 (высокочастотные)	10^{11}—10^{12}	6—8	0,010—0,012 при 10^6 Гц	15—20	
В1, В2, В3, В4, В5 (с повышенными электроизоляционными свойствами)	10^{10}—10^{12}	4—6	0,03—0,05	12—14	Связующее — мочевино- и меламиноформальдегидные смолы; наполнитель — органический, минеральный, их смесь
Д1, Е1 (с повышенными дугостойкостью, теплостойкостью и механической прочностью)	10^{10}—10^{11}	4—5	0,05—0,06	5—10	
АГ-4 (для работы в интервале температур от —196 до +200 °С и в тропических условиях)	10^{10}—10^{11}	5—8 при 10^6 Гц	0,02—0,05 при 10^6 Гц	13—18	Связующее — модифицированная фенолформальдегидная смола; наполнитель — стекловолокно

Марка пластмасс	ρ, Ом · м	ε_r	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	Состав
КМК-218; ВПМ-1; ПК-9; Кф-9; КФ-10 и др. (рабочие температуры 200—350 °С, тропикостойкие)	10^{10}—10^{13}	3—6	0,004—0,02	4—7 (у КФ до 20)	Кремнийорганические смолы с минеральным наполнителем
Эбонит	10^{12}—10^{13}	2,8—3,5	0,004—0,013 при 10^6 Гц	20—35	«Твердая резина», вулканизированная 30—35% серы
Эскапон	10^{14}—10^{15}	2,7—2,9	0,0005 при 10^6 Гц	30—35	Синтетический каучук СКБ, полимеризованный без вулканизаторов

Таблица 23.14. **Свойства осиовных видов слоистых пластиков при 20 °С [9, 29]**

Пластик	ρ, Ом · м	ρ_S, Ом	ε_r	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м	Состав
Гетинакс низковольтный (марки I, II, III, IV, VI)	10^{10}—10^{11}	10^{12}	7—8	0,10—0,40	20—35	Целлюлозная бумага — наполнитель. Связующее — резольные смолы фенолформальдегидного типа и эпоксидная смола
Гетинакс высоковольтный (V)	10^{11}	10^{13}	7—8	0,015	27—30	
Гетинакс высокочастотный (VII, VIII)	10^{10}—10^{11}	10^{12}—10^{13}	7—8	0,020—0,025 при 10^6 Гц	28—40	
Текстолит низковольтный (марки А, Б, Г)	10^8—10^9	10^{11}—10^{12}	8	<0,6	4,5—12	Хлопчатобумажная ткань и лавсановая (ЛТ) — наполнитель. Связующее — резольные смолы фенолформальдегидного типа и эпоксиднофенольная смола (ЛТ)
Текстолит высокочастотный:						
марки ВЧ	10^{10}	10^{12}	7—8	0,05 при 10^6 Гц	8—16	
марки ЛТ	10^{12}	10^{13}	4	0,03 при 10^6 Гц	25—32	
Стеклотекстолит низковольтный, рабочая температура 130 °С (марки СТ, СТ-Б, СТ-1)	10^9—10^{11}	10^{11}—10^{13}	—	<0,4	10—25	Стеклоткань — наполнитель, связующее — фенолформальдегидные, эпоксидные и кремнийорганические смолы
То же, рабочая температура 155 °С (марка СТ-II)	10^{11}	10^{12}—10^{13}	—	—	12—20	
Стеклотекстолит с рабочей температурой 155 °С;						
высоковольтный (СТЭФ-1)	10^{11}	10^{13}	5—6	0,03—0,05	20—30	
высоковольтный и высокочастотный (СТЭФ)	10^{11}—10^{12}	10^{13}—10^{14}	5—6	0,003—0,005	20—30	
Стеклотекстолит с рабочей температурой 180°С высоковольтный (СТК)	10^{12}—10^{13}	—	—	0,001—0,005	18—25	

Таблица 23.15. **Характеристики электроизоляционных компаундов при 20 °С [9—11, 30]**

Марка компаунда и тип	Температура размягчения, °С	Холодостойкость, °С (не выше)	Объемная усадка, % (не более)	ρ, Ом · м	ε_r	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м
Пропиточные							
225 (битумный)	97—102	—25	8,0—8,5	10^{11}—10^{12}	2,8—3,2	0,02	20—22
КГМС-1 (полиэфирный горячего отверждения)	250	—60	6—7	10^{11}—10^{12}	6	0,02—0,04	18—22
КГМС-2 — то же, но более эластичный	250	—60	8—10	10^{11}—10^{12}	6	0,02—0,04	18—20

Марка компаунда и тип	Температура размягчения, °С	Холодостойкость °С (не выше)	Объемная усадка, % (не более)	ρ, Ом · м	ε_r	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м
КП-18 (полиэфирный горячего отверждения)	Не размягчается	—50	—	10^{10}—10^{11}	4,4—5,0 при 10^3 Гц	0,02—0,03 при 10^3 Гц	28—33
Д1 (эпоксидный горячего отверждения)	То же	—50	0,5—1	10^{11}—10^{12}	4,0 при 10^6 Гц	0,01—0,02 при 10^6 Гц	28—30
К-67, К-67Ф (кремнийорганические горячего отверждения)	» »	—60	5—8	10^{13}—10^{14}	—	0,005—0,015	20—22
Пропиточно-заливочные							
МБК-1 (метакриловый твердый)	250	—60	0,5	10^{11}—10^{12}	3,1—3,5	0,05—0,07	20—25
МБК-2 (то же менее твердый)	250	—60	0,5	10^{10}—10^{11}	4,0—5,6	0,03—0,04	17—20
МБК-3 (то же эластичный)	250	—60	0,5	10^{10}—10^{11}	4,5—5,2	0,03—0,04	16—18
К-168 (эпоксидный холодного отверждения)		—60	0,5—1,5	10^{10}—10^{12}	—	0,02—0,04	25—30
К-293 (то же горячего отверждения)		—60	1—2	10^{10}—10^{12}	—	0,05—0,08	20—25
Заливочные							
К-30 (полиуретановый горячего отверждения)	Не размягчается	—80	3—4	10^9—10^{10}	6	0,02—0,03	27—30
К-31 (то же)	То же	—80	3—4	10^{12}—10^{13}	5	0,05—0,07	27—30
Виксинт К-18 (кремнийорганический холодного отверждения)		—60	2—3	10^{11}—10^{12}	3,0	0,01—0,02	15—18
МК-45 (маслоканифольный)	45—48	—8	6—7	10^9—10^{10}	—	—	12—16
МБ-70 (битумный)	70—73	—10	8—9	10^{10}—10^{11}	—	—	14—16
МБ-90 (битумный)	90—92	—10	8—9	10^{10}—10^{11}	—	—	14—16
МБМ (битумно-масляный)	55—60	—45	7—8	10^{10}—10^{11}	—	—	15—17

Таблица 23.16. **Характеристики волокнистых материалов [11]**

Вид материала	Марка	Толщина, мм	Механические характеристики	tg δ (при 50 Гц)	Пробивное напряжение слоя, В, не менее	$E_{пр}$, МВ/м
			Разрывная длина, м			
Бумага конденсаторная обычная	КОН-1	0,010—0,030	8000	⩽0,26 при 100 °С	360—620	—
	КОН-2	0,004—0,030	8500	⩽0,32 при 100 °С	240—680	—
Бумага конденсаторная специальная улучшенного качества	СКОН-1	0,010—0,030	8000	⩽0,20 при 100 °С	380—620	—
	СКОН-2	0,004—0,022	8500	⩽0,24 при 100 °С	270—590	—
	СКОН-3	0,005—0,022	8500	⩽0,32 при 100 °С	300—610	—
Бумага конденсаторная с малыми диэлектрическими потерями	МКОН-08	0,010—0,020	8000	⩽0,12—0,16 при 120 °С	320—470	—
	МКОН-1	0,008—0,030	8000	⩽0,16—0,20 при 120 °С	340—620	—
	МКОН-2	0,006—0,030	8000	⩽0,22—0,28 при 120 °С	300—680	—
	МКОН-3	0,006—0,015	8000	⩽0,26—0,32 при 120 °С	310—520	—
			Разрывное усилие, Н			
Бумага кабельная	К-080	0,080	83,4	Не нормируется	Не нормируется	—
	К-120	0,120	127,5			
	К-170	0,170	171,7			
Бумага кабельная многослойная	КМ-120	0,120	142,2	То же	То же	—
	КМ-170	0,170	186,4			
Бумага кабельная многослойная упрочненная	КМП-120	0,120	152,0	«	»	—
	КМП-170	0,170	196,2			—
Бумага кабельная высоковольтная многослойная	КВМ-080	0,080	74	⩽0,0022 при 100 °С	»	—
	КВМ-120	0,120	142	⩽0,0022 при 100 °С		—
	КВМ-170	0,170	186	⩽0,0022 при 100 °С		—

Вид материала	Марка	Толщина, мм	Механические характеристики	tg δ (при 50 Гц)	Пробивное напряжение слоя, В, не менее	$E_{пр}$, МВ/м
Бумага кабельная высоковольтная многослойная стабилизированная	КВМС-080	0,080	69	⩽0,0018 при 100 °С	Не нормируется	—
	КВМС-120	0,120	108	⩽0,0019 при 100 °С		—
	КВМС-170	0,170	147	⩽0,0019 при 100 °С		—
Бумага кабельная многослойная стабилизированная уплотненная	КВМСУ-080	0,080	98	⩽0,0026 при 100 °С	То же	—
	КВМСУ-120	0,120	137	⩽0,0026 при 100 °С		—
Бумага телефонная	КТ-50	0,050	60,8	Не нормируется		—
Бумага электроизоляционная крепированная	ЭКТМ	0,44	44,2	То же		⩾40 в масле при (90±5) °С
Бумага кабельная полупроводящая уплотненная одноцветная с включением в композицию сажи	КПУ-80	0,080	78,4	$\rho = 10^3 \div 9 \cdot 10^4$ Ом·м		—
	КПУ-120	0,120	117,6			
Бумага кабельная полупроводящая двухцветная уплотненная с включением сажи в композицию одного слоя	КПДУ-80	0,080	94	$\rho_s = 5 \cdot 10^4 \div 10^6$ Ом		—
	КПДУ-120	0,120	127,4			
			Предел прочности при растяжении в продольном направлении, МПа			
Картон электроизоляционный для работы в воздушной среде	ЭВ	0,10—3,0	83—98	Не нормируется		8—12
	ЭВС	0,20—0,40	127			12
	ЭВП	0,10; 0,20	127			12
	ЭВТ	0,10—0,50	118			12—13
	ЭВА	0,15	118			11
					Испытательное напряжение, кВ	
Картон электроизоляционный для работы в трансформаторном масле	АМ	2,0; 2,5; 3,0	39	То же	40—50	
	А	2,0; 2,5; 3,0	39		40—50	
	Б	1,0—6,0	49		31—90	
	В	2,0; 2,5; 3,0	59		55—70	
	Г	0,5—3,0	34—39		19—57	
Фибра листовая электротехническая и техническая	ФЭ	0,4—3,0	69—74	То же		⩾3,5—7,0
	ФТ	0,6—25,0	29—49			⩾2—4

Примечание. Разрывная длина — длина, при которой бумага разрывается под действием собственной массы. Разрывное усилие прикладывается к полоске бумаги шириной 15 мм.

Таблица 23.17. **Характеристики лакотканей** [11]

Марка лакоткани	Основа лакоткани (ткань)	Пропиточный состав	Номинальная толщина, мм	Удельная разрывная нагрузка (по основе), Н/см	ρ, Ом·м (не менее)	$U_{пр}$, кВ		Нагревостойкость, °С
						при 15—35 °С и относительной влажности воздуха 45—75%	после 24 ч выдержки при 20 °С при относительной влажности воздуха (95±2) %	
ЛХМ-105	Хлопчатобумажная	Масляный лак	0,15; 0,17; 0,20; 0,24; 0,30	38—45	10^{11}	4—9,5	1,5—4,0	105
ЛХМС-105	То же	То же	0,17; 0,20; 0,24	44—51	10^{11}	4,5—7,4	1,9—3,5	105
ЛХММ-105	»	»	0,17; 0,20; 0,24	50—64	10^{11}	4,8—9,2	2,0—4,0	105

Марка лакоткани	Основа лакоткани (ткань)	Пропиточный состав	Номинальная толщина, мм	Удельная разрывная нагрузка (по основе), Н/см	ρ, Ом·м (не менее)	$U_{пр}$, кВ: при 15—35 °С и относительной влажности воздуха 45—75%	$U_{пр}$, кВ: после 24 ч выдержки при 20 °С при относительной влажности воздуха (95±2) %	Нагревостойкость, °С
ЛХБ-105	Хлопчатобумажная	Битумно-масляный лак	0,17; 0,20; 0,24	58—80	10^{11}	4,5—9,2	2,0—3,6	105
ЛШМ-105	Шелковая	Масляный лак	0,08; 0,10; 0,12; 0,15	7—24	10^{11}	2,3—8,5	1,4—3,8	105
ЛШМС-105	»	То же	0,04; 0,05; 0,06; 0,10; 0,12	11—25	10^{11}	0,4—9,3	2,0—4,2	105
ЛКМ-105	Капроновая	» »	0,10; 0,12; 0,15	20—30	10^{11}	3,3—7,8	1,7—3,4	105
ЛКМС-105	»	» «	0,10; 0,12; 0,15	20—30	10^{11}	3,6—9,3	2,0—4,2	105
ЛСМ-105/120	Стеклянная	» »	0,15; 0,17; 0,20; 0,24	85—170	10^{11}	3,2—8,0	1,5—4,2	120
ЛСММ-105/120	»	» »	0,17; 0,20; 0,24	95—170	10^{11}	4,0—9,2	2,3—4,6	120
ЛСЛ-105/120	»	Бутадиен-стирольный латекс	0,15; 0,17; 0,20	95—150	10^{12}	3,2—6,8	1,3—3,0	120
ЛСЭ-105/130	»	Эскапоновый лак	0,12; 0,15; 0,17; 0,20; 0,24	70—170	10^{12}	2,6—9,6	0,7—3,6	130
ЛСБ-120/130	»	Битумно-масляно-алкидный лак	0,12; 0,15; 0,17; 0,20; 0,24	70—170	10^{12}	2,6—10,8	0,9—4,1	130
ЛСП-130/155	»	Полиэфирно-эпоксидный лак	0,08; 0,10; 0,12; 0,15; 0,17	35—130	10^{10}	0,8—9,0	0,6—3,5	155
ЛСК-155/180	»	Кремнийорганический лак	0,05; 0,06; 0,08; 0,10; 0,12; 0,15; 0,17 0,20	20—150	10^{12}	1,0—9,0	0,6—5,0	180
ЛСКР-180	»	Кремнийорганическая резина	0,12; 0,15; 0,17; 0,20	70—150	10^{12}	0,7—4,9	0,6—2,7	180
ЛСКЛ-155	»	Кремнийорганический лак липкий	0,12; 0,15	70—105	10^{12}	0,8—0,9	—	155
ЛСУ	»	Полиуретановый лак	0,13 0,15; 0,17	90—130	10^{11}	5,5—9,5	3,0—5,5	155
ЛСК-2	»	Кремнийорганическая эмаль	0,12; 0,15; 0,20	50—120	10^{11}	2,5—7,5	1,3—4.2	180
ЛСК-5	»	Полупроводящая кремнийорганическая эмаль	0,12; 0,15; 0,20	70—150	$\rho_s = 10^3 \div 10^5$ Ом	—	—	180

Таблица 23.18. **Характеристики электроизоляционных слюд при 20 °С [9]**

Разновидность слюды	Нагревостойкость, °С	ρ, Ом · м	ρ_s, Ом	ε_r	tg δ при 50 Гц	tg δ при 10^6 Гц	$E_{пр}$, МВ/м
Мусковит	500—600	10^{12}—10^{14}	10^{11}—10^{12}	6,1—8,4	0,0004—0,008	0,0001—0,0004	100—250
Флогопит	800—1000	10^{11}—10^{12}	10^{10}—10^{11}	5,5—6,7	0,006—0,015	0,0002—0,006	70—150
Фторфлогопит (синтетическая слюда)	1000—1050	10^{12}—10^{14}	10^{14}—10^{15}	6,1—7,5	—	0,0001—0,0003	100—250

Таблица 23.19. **Характеристики некоторых видов миканитов и микалекса [9—11]**

Наименование	Марка	Виды слюды и склеивающего вещества	Толщина, мм	ρ при 20 °С, Ом · м	$E_{пр}$ при 20 °С, МВ/м	Нагревостойкость, °С
Миканит коллекторный	КФШ	Флогопит обычный; шеллак	0,4—1,5	10^{11}—10^{12}	19—22	130
	КФГ	То же глифталевая смола	0,4—1,5	10^{12}—10^{13}	19—22	130
	КФП	» ; полиэфирная смола	0,7—1,5	10^{11}—10^{12}	19—22	155
	КФА	Флогопит нагревостойкий; аммофос	0,7—1,2	10^{11}—10^{12}	19—22	>180

Наименование	Марка	Вид слюды и склеивающего вещества	Толщина, мм	ρ при 20 °С, Ом · м	$E_{пр}$ при 20 °С, МВ/м	Нагревостойкость, °С
Миканит прокладочный	ПМГ ПФГ ПСГ	Мусковит, флогопит обычный; их смесь; глифталевая смола	0,5—1,0	10^{11}—10^{12}	16—23	130
	ПФК	Флогопит нагревостойкий, кремнийорганическая смола	0,15—1,0	10^{10}—10^{11}	16—38	180
Миканит гибкий	ГМС ГФС	Мусковит, флогопит; масляно-глифталевый лак (светлый)	0,15	10^{11}—10^{12}	20—30	130
	ГМЧ ГФЧ	Мусковит, флогопит; битумно-масляный лак (черный)	0,2—0,5	10^{11}—10^{12}	20—30	130
	ГМС-ББ ГФС-ББ ГМЧ-ББ ГФЧ-ББ	Мусковит, флогопит; светлый и черный лаки. Миканит оклеен бумагой с двух сторон	0,2—0,5	10^{11}—10^{12}	16—23	130
	ГФК	Флогопит; кремнийорганический лак	0,2—0,5	10^{11}—10^{12}	19—25	180
Микалес		Порошок слюды мусковит — наполнитель, легкоплавкое стекло — связующее	4—15	10^{10}—10^{12}	13—18	300—350

Таблица 23.20. **Характеристики некоторых видов слюдинитов и слюдопластов [9—11]**

Наименование	Марка	Вид склеивающего материала, подложки	Толщина, мм	ρ при 20 °С, Ом · м	$E_{пр}$, МВ/м	Нагревостойкость, °С
Слюдинит коллекторный	КСШ	Шеллак	0,45—1,2	10^{10}—10^{12}	28—35	130
Слюдинит гибкий	ГСП	Полиэфирный лак	0,15—0,30	10^{11}—10^{12}	17—23	130
	$Г_1$СП	То же; стеклоподложка с одной стороны	0,10, 0,15	10^{11}—10^{12}	20—22	130
	$Г_2$СП	То же; стеклоподложки с двух сторон	0,2—0,3	10^{11}—10^{12}	28—30	130
	ГСП-ПЛ-10	Полиэфирный лак; полиэтилентерефталатная пленка толщиной 10 мкм с одной стороны	0,15; 0,20	10^{11}—10^{12}	30—32	130
	ГСП-ПЛ-20	То же, 20 мкм	0,20; 0,25	10^{11}—10^{12}	28—30	130
	ГСП-ПЛ-50	То же, 50 мкм	0,25; 0,30	10^{11}—10^{12}	26—28	130
	$Г_1$СК	Кремнийорганический лак; стеклоподложка с одной стороны	0,10; 0,15	10^{11}—10^{12}	20—22	155
	$Г_2$СК	То же, стеклоподложки с двух сторон	0,2—0,3	10^{11}—10^{12}	28—30	155
	$Г_1$СКН	Кремнийорганический лак нагревостойкий; стеклоподложка с одной стороны	0,10; 0,15	10^{11}—10^{12}	20—32	300
	$Г_2$СКН	То же; стеклоподложки с двух сторон	0,2—0,3	10^{11}—10^{12}	26—28	300
Слюдопласт коллекторный	КИФШ	Шеллак	0,4—1,5	10^{10}—10^{11}	22—26	130
	КИФП	Полиэфирная смола	0,4—1,5	10^{10}—10^{11}	22—24	155
	КИФН-С	Нагревостойкое связующее	0,4—1,5	10^{11}—10^{12}	24—26	>180
	КИФК	Кремнийорганическая смола	0,4—1,5	10^{11}—10^{12}	24—26	>180
Слюдопласт прокладочный	ПИФШ	Шеллак	0,5—1,5	10^{11}—10^{12}	20—28	130
	ПИФША	»	0,5—1,5	10^{11}—10^{12}	20—28	130
	ПИФТ	Алюмофосфат с кремнийорганическим лаком	0,5—1,5	10^{11}—10^{12}	20—28	>180

Наименование	Марка	Вид склеивающего материала, подложки	Толщина, мм	ρ при 20 °С, Ом · м	$E_{пр}$, МВ/м	Нагревостойкость, °С
Слюдопласт композиционный (гибкий)	ГИТ-ТС	Триэтиленглифталевый или глифталевый лак; подложки из стеклоткани и стеклосетки	0,25; 0,30	10^{11}—10^{12}	10—19	130
	ГИП-ТС ГИП-СС	Полиэфирный лак; подложки из стеклоткани и стеклосетки или обе подложки из стеклосетки	0,35—0,45	10^{11}—10^{12}	10—19	155
	ГИК-ТС ГИК-СС	Кремнийорганический лак; подложки из стеклоткани и стеклосетки или обе подложки из стеклосетки	0,35—0,45	10^{11}—10^{12}	9—18	180

Таблица 23.21. **Свойства электротехнических кварцевых стекол** [9]

Характеристика	Вид стекла	
	Прозрачное	Непрозрачное
Средний ТК линейного расширения, $°C^{-1}$, в интервале температур, °С:		
20—50	$4{,}0\cdot10^{-7}$	—
120—420	$6{,}0\cdot10^{-7}$	—
420—1200	$5{,}0\cdot10^{-7}$	—
ρ, Ом · м, при t, °С:		
20	10^{14}	10^{13}
200	10^{12}	10^{10}
600	—	10^{4}
1000	10^{6}	10^{2}
ε_r	3,8	3,7
tg δ, 10^{-4}, при 10^{10} Гц и 20 °С	1,0	3,0
То же при 1000 °С	5,0	—
$E_{пр}$, МВ/м, при t, °С:		
20	44	32
200	32	21
600	6	3

Таблица 23.22. **Свойства некоторых электроизоляционных стекол** [9]

Марка стекла	Средний ТК линейного расширения в интервале 20—300 °С, 10^{-7} $°C^{-1}$	ε_r при 20 °С		tg δ, 10^{-4}, при 20 °С		ρ, Ом · м	
		при 10^6 Гц	при 10^{10} Гц	при 10^6 Гц	при 10^{10} Гц	при 150 °С	при 300 °С
С5-1	5	3,81	3,80	1	1	—	—
С40-1	40,0±1,5	5,10	4,70	22	53	—	—
С48-1	48,0±1	5,40	4,90	22	65	—	—
С87-1	87,0±1	7,20	6,80	13	62	—	—
С63-1	63,0±2	14,0	12,0	18	131	$3\cdot10^{11}$	$6{,}2\cdot10^{7}$
С77-1	77,0±2	13,0	11,0	12	78	$9\cdot10^{11}$	$6{,}3\cdot10^{7}$

Таблица 23.23. **Свойства некоторых марок технических ситаллов** [9]

Марка ситалла	Средний ТК линейного расширения в интервале 300—400 °С, 10^{-7} $°C^{-1}$	ε_r при 25 °С		tg δ, 10^{-4} при 25 °С		ρ, Ом · м	ρ_s, Ом	$E_{пр}$, МВ/м
		при 10^6 Гц	при 10^{10} Гц	при 10^6 Гц	при 10^{10} Гц			
С-15-12 (СТЛ-1)	1,2	9,7	—	461	—	$2{,}2\cdot10^{10}$	$1{,}8\cdot10^{11}$	70,7
С-12-14 (СТЛ-5)	7,0	7,4	7,05	32	153	$4{,}1\cdot10^{11}$	$1{,}9\cdot10^{12}$	27,0
ТС-81 (СТЛ-8)	17	7,0	6,42	41	64	$3{,}3\cdot10^{10}$	$2{,}35\cdot10^{11}$	29,6
АС-05-С-023 (СТЛ-10)	120	5,7	5,40	21	120	$4{,}6\cdot10^{10}$	$1{,}15\cdot10^{11}$	85,3
СТ-50-1 (СТМ-2)	50	8,3	7,90	15	45	$7{,}1\cdot10^{10}$	$4{,}56\cdot10^{11}$	47,2
СТ-50-2 (СТМ-3)	50	5,6	5,50	200	5	$3{,}2\cdot10^{10}$	$1{,}67\cdot10^{11}$	27,9
АС-05-336 (СТБ-2)	48	5,1	4,96	10	17	$4{,}9\cdot10^{10}$	$1{,}04\cdot10^{12}$	65,9

Таблица 23.24. **Осиовные характеристики электрокерамических материалов** [10]

Материал	Плотность, кг/м³	Механические характеристики			ТК линейного расширения, $10^{-6°}$ C^{-1}	Электрические характеристики при 20 °С			
		Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при статическом изгибе, МПа	Удельная ударная вязкость, кДж/м²		ρ, Ом · м	ε_r	tg δ при 50 Гц	$E_{пр}$, МВ/м
Электрофарфор	2200	30—55	60—110	1,8—2,2	3,5—5,0	10^{11}—10^{12}	5—8	0,022—0,025	30—32
Ультрафарфор УФ-46 и УФ-43	3200	50—60	200—250	2,5—2,8	5,0—5,5	10^{12}—10^{13}	8,0—8,8	0,0005—0,001	30—36
Стеатит СК-4, ТК-21	3000	60—70	170—190	3,0—3,5	6,0—6,4	10^{13}—10^{14}	6,5—7,0	0,001—0,003	40—42
Кордиерит	2800	—	70—88	2,0—3,0	2,0—2,3	10^{9}—10^{10}	5—6	—	4,5—6,0

Примечание. Механические характеристики относятся к неглазурованным образцам. У глазурованного фарфора и стеатита характеристики выше на 15—20%. Значения ТК расширения даны для интервала температур 20—100 °С.

полимеризации и поликонденсации. Некоторые полимеры последнего типа по аналогии с природными материалами также называют смолами (например, фенолформальдегидные смолы, полиэфирные, эпоксидные). В трехтомной энциклопедии полимеров представлены подробные сведения по всем разделам химии, физики и технологии полимеров и полимерных материалов (пластмасс, каучуков и резин, химических волокон, пленочных материалов, лаков, красок и др.) [27]. Свойства природных смол приведены в табл. 23.11.

Пластмассы — композиционные материалы, основой которых являются полимеры, определяющие главные свойства и выполняющие роль связующего, соединяющего все компоненты материала в монолит. Остальные компоненты — наполнители, пластификаторы, стабилизаторы и другие — при введении в неполярные полимеры снижают их электроизоляционные свойства. Поэтому пластмассы на основе таких полимеров — отличных диэлектриков — состоят практически только из связующего. В табл. 23.12 приведены свойства термопластичных полимерных органических диэлектриков и материалов на их основе, в табл. 23.13 — свойства термореактивных пластмасс, а в табл. 23.14 — слоистых пластиков с листовым (рулонным) наполнителем.

Электроизоляционные компаунды (составы) — твердеющие материалы. При технологическом применении (пропитке, заливке) находятся в жидком состоянии. В рабочем состоянии они тверды. Их свойства приведены в табл. 23.15.

Свойства волокнистых материалов — бумаг (в том числе полупроводящей), картона и фибры указаны в табл. 23.16, а лакотканей (и полупроводящей тоже) — в табл. 23.17.

Слюда — неорганический диэлектрик. В табл. 23.18 приведены свойства важнейших видов слюды. Миканиты — клеевые листовые материалы на основе слюды, которые могут иметь и волокнистые подложки. В табл. 23.19 приведены свойства некоторых видов миканитов и микалекса (пластмассы на основе слюды). Заменителями миканитов являются материалы из слюдяных бумаг — слюдиниты и слюдопласты; свойства некоторых их видов приведены в табл. 23.20. Слюдинитовая бумага получается из отходов слюды мусковит, а слюдопластовая — из отходов слюды флогопит.

Стекла — неорганические аморфные вещества, представляющие собой обычно системы различных окислов. В табл. 23.21 указаны свойства кварцевых стекол, а в табл. 23.22 — ряда других электроизоляционных стекол.

Ситаллы — стеклокристаллические материалы, получаемые путем кристаллизации стекол специального состава. Свойства технических ситаллов некоторых марок даны в табл. 23.23.

Электротехническая керамика — камнеподобный материал, получаемый спеканием массы заданного состава и состоящий из кристаллической и аморфной фаз. Свойства распространенных электрокерамических материалов приведены в табл. 23.24.

23.5. Активные диэлектрики

Сегнетоэлектриками называют диэлектрики, обладающие в определенном температурном диапазоне спонтанной поляризацией. К своеобразным свойствам сегнетоэлектриков относятся: высокое и сверхвысокое значение ε_r; резкая зависимость ε_r от температуры с острыми пиками в точке Кюри; резкая зависимость ε_r от напряженности электрического поля. Эти свойства используются в устройствах на основе сегнетокерамических материалов. На рис. 23.8 приведена зависимость ε_r титаната бария от температуры, откуда видно, что при 125 °С у этого материала существует точка Кюри. На рис. 23.9 для этого же материала показана зависимость ε_r от напряженности

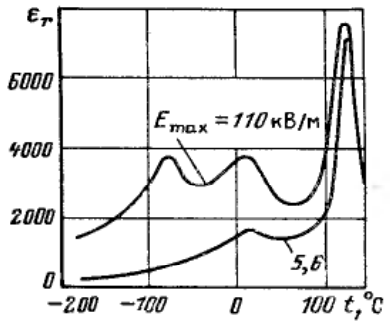


Рис. 23.8. Зависимость ε_r титаната бария от температуры при различной напряженности электрического поля [32]

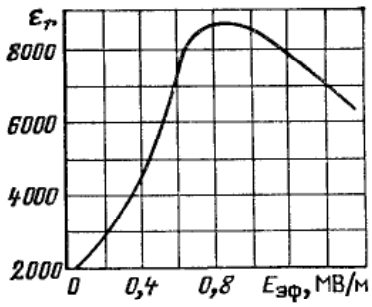


Рис. 23.9. Зависимость ε_r титаната бария от напряженности электрического поля при температуре 22°С [32]

электрического поля $E_{эф}$. На основе сегнетокерамики созданы вариконды — нелинейные диэлектрические конденсаторы, емкость которых резко изменяется при изменении воздействующих на них переменных и постоянных электрических напряжений. Свойства сегнетокерамики для варикондов приведены в табл. 23.25. Основными характеристиками варикондов являются: точка Кюри T_C; $\varepsilon_н$ — начальная диэлектрическая проницаемость в слабом переменном электрическом поле (2—5 кВ/м); коэффициент нелинейности по переменному полю $K_{\sim} = \varepsilon_{max}/\varepsilon_н$, где ε_{max} — максимальное значение диэлектрической проницаемости в переменном поле (при $E = E_{max}$); коэффициент реверсивной нелинейности по постоянному полю $K_{=} = \varepsilon_{\sim}/\varepsilon_{min}$, где $\varepsilon_{\sim}$ — диэлектрическая проницаемость в переменном поле при отсутствии смещающего постоянного поля, ε_{min} — диэлектрическая проницаемость при том же переменном поле и значительном смещающем постоянном поле, когда ε уже практически не зависит от смещающего поля.

Пьезоэлектрики — кристаллические диэлектрики, не имеющие центра симметрии, в которых под действием механических напряжений возникает электрическая поляризация (прямой пьезоэлектрический эффект), а под действием внешнего электрического поля — механическая деформация (обратный пьезоэлектрический эффект). Таким образом, с помощью пьезоэлектриков можно преобразовывать электрические сигналы в механические и наоборот. Между поверхностной плотностью заряда q, образующегося при прямом пьезоэффекте на поверхности поляризованного кристалла, и механическим напряжением σ существует прямо пропорциональная зависимость $q = d\sigma$, причем знаки зарядов на электродах пьезоэлемента зависят от направления механических напряжений (сжатие — растяжение). Механическая деформация u в такой же зависимости находится с напряженностью внешнего электрического поля E при обратном пьезоэффекте: $u = dE$, а характер деформации (сжатие или растяже-

ние) определяется направлением поля (полярностью напряжения, приложенного к электродам пьезоэлемента).

Коэффициент d (пьезомодуль) у одного и того же диэлектрика одинаков как для прямого, так и для обратного пьезоэффекта. В качестве пьезоэлектрических применяются материалы с ярко выраженными пьезосвойствами: пьезоэлектрические монокристаллы и пьезокерамика. Обычная сегнетокерамика как изотропная среда не обладает пьезосвойствами. Для придания этих свойств сегнетокерамику поляризуют: выдерживают в нагретом состоянии в сильном постоянном электрическом поле [33, 34]. В итоге векторы спонтанной поляризованности доменов внешним полем ориентируются, из изотропного тела керамика превращается в анизотропное, обладающее устойчивой остаточной поляризованностью P_0, направление которой определено поляризующим полем. Это приводит к появлению пьезоэффекта.

Помимо пьезомодуля, значение которого зависит от кристаллографического направления, для оценки пьезоэлементов применяют коэффициент электромеханической связи K, характеризующий эффективность преобразования механической энергии в электрическую и наоборот (при прямом и обратном пьезоэффекте), а также механическую добротность $Q_м$, определяемую потерями на внутреннее трение в материале, от значения которой существенно зависит увеличение амплитуды колебаний элемента при резонансной частоте. Работоспособность пьезоматериалов определяется также значениями ε_r, tg δ и точкой Кюри T_C.

Пьезокерамические материалы в зависимости от назначения делят на четыре класса.

Материалы класса I применяют для высокочувствительных пьезоэлементов, в частности, в режиме слабых сигналов, когда определяющим параметром является пьезомодуль.

Материалы класса II предназначены для применения в условиях сильных электрических полей и высоких механических напряжений. Дополнительным требованием здесь является малый tg δ и высокая механическая добротность $Q_м$.

Материалы класса III применяют для пьезоэлементов с повышенной стабильностью резонансных частот во времени и с изменением температуры, с высокой механической добротностью $Q_м$.

К классу IV относят материалы для высокотемпературных пьезоэлементов (с T_C выше 300 °С).

В табл. 23.26 приведены параметры некоторых промышленных пьезокерамических материалов. Их подразделяют на три типа:

Тип А. Материалы системы титаната бария (ТБ-1, ТБК-3, ТБКС).

Тип Б. Материалы системы цирконата-титаната свинца (ЦТС-19, ЦТС-21, ЦТС-22, ЦТС-23, ЦТС-24, ЦТС-300).

Тип В. Материалы ниобатной системы [НБС-1, НБС-3, $(K_{0,5}Na_{0,5})NbO_3$].

Пьезомодуль измеряется в пКл/Н (1 пКл$=10^{-12}$ Кл). Если направление остаточной поляризации P_0 принять за ось 3, то пьезоэффект вдоль этой оси характеризуется пьезомодулем d_{33} при сжатии—растяжении материала вдоль оси 3, а пьезомодулем d_{31} — при деформации в перпендикулярной плоскости.

Вследствие высоких значений ε_r, tg δ и малой $Q_м$ пьезокерамику нецелесообразно использовать на частотах выше 10 МГц. На ВЧ и СВЧ применяют монокристаллические пьезоэлектрики, причем наиболее часто — кварц. Кристалл кварца — шестигранная призма, увенчанная двумя пирамидами (рис. 23.10). Для оценки свойств кварца используют прямоугольную систему координат. При этом оптическая

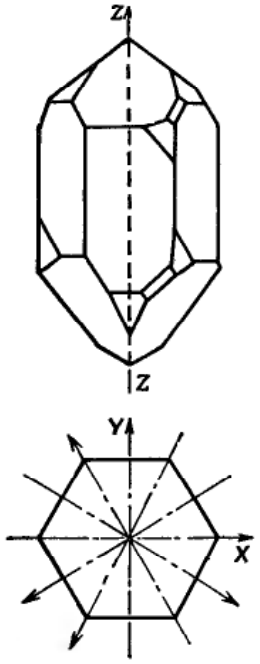


Рис. 23.10. Кристалл правого кварца и его оси [19]

Таблица 23.25. **Свойства сегнетокерамики для варикондов** [20, 31]

Материал	T_C, °С	$\varepsilon_н$ при 20 °С	$K_\sim$	E_{max}, кВ/м	K_-	tg δ при 20 °С
ВК-1	75	2300—2500	6—8	150—200	$\geqslant 2$	0,02
ВК-2	75	2000—2500	15—20	120—150	$\geqslant 2$	0,01
ВК-3	25	10 000—20 000	1—2	50—100	$\geqslant 8$	0,03
ВК-4	105	1800—2000	10—16	250—300	$\geqslant 2$	0,015
ВК-5	25	2000—3000	35—50	80—100	$\geqslant 2$	0,01
ВК-6	200	400—500	20—50	500—600	—	0,03
ВК-7	<20	2000—4000	—	—	$\geqslant 2$	0,001

Таблица 23.26. **Характеристики промышленных пьезокерамических материалов** [20]

Марка материала	Класс	T_C, °С	ε_r	tg δ	Пьезомодули, пКл/Н		K	$Q_м$
					$-d_{31}$	d_{33}		
ТБ-1	I	120	1400	0,01	45—78	100—190	0,2—0,36	100—300
ТБК-3	II	105	1200	0,02	43	77	0,25	$\geqslant 300$
ТБКС	III	160	450	0,002	27	77	0,25	$\geqslant 350$
ЦТС-19	I	290	1400	0,03	119	282	0,47	70
ЦТС-21	IV	410	550	0,02	27	67	0,20	100
ЦТС-22	III	330	800	0,02	50	100	0,20	$\geqslant 400$
ЦТС-23	II	280	1050	0,007	100	200	0,43	$\geqslant 200$
ЦТС-24	II	280	1050	0,007	100	200	0,45	$\geqslant 200$
ЦТС-300	III	330	1100	0,003	95	280	0,43	500
НБС-1	II	265	1600	$\leqslant 0,02$	67	167	0,28	150
НБС-3	III	270	1800	0,025	40	100	0,20	$\geqslant 300$
$(K_{0,5}Na_{0,5})NbO_3$	IV	420	420	0,013	49	160	0,45	240

ось Z проходит вдоль кристалла через вершины пирамид. Три оси X, называемые электрическими, проходят через вершины шестиугольника в плоскости, перпендикулярной оси Z. Три оси Y, проходящие перпендикулярно сторонам того же шестиугольника, называют механическими.

Кристаллы кварца отличаются очень высокой механической добротностью ($5 \cdot 10^4$—10^7 и выше у синтетических кристаллов) и малыми значениями tg δ (не более $2 \cdot 10^{-4}$) и ε_r (4,52—4,63), что обеспечивает работоспособность пьезоэлементов на высоких частотах, хотя пьезомодули кварца невелики (d_{11}=2,31 пКл/Н, d_{14}= =0,7 пКл/Н). Значение коэффициента электромеханической связи K у кварца невелико и составляет только 0,1. Пьезомодуль d_{11} определяет поляризацию вдоль оси X при деформации вдоль этой оси, а d_{14} — при деформации сдвига в плоскости, перпендикулярной оси X.

Наиболее широкое применение находят пластины косых срезов кристалла кварца, отличающиеся термостабильностью частоты механических колебаний и другими полезными свойствами [9, 20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сканави Г. И.** Физика диэлектриков (область слабых полей). М.: Гостехиздат, 1949.
2. **Сканави Г. И.** Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: Физматгиз, 1958.
3. **Теория** диэлектриков/Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобинскнй, А. А. Воробьев, Б. М. Тареев. М.: Энергия, 1965.
4. **Поплавко Ю. М.** Физика диэлектриков. Киев: Вища школа, 1980.
5. **Тареев Б. М.** Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1982.
6. **Бёиинг П.** Электрическая прочность изоляционных материалов и конструкций: Пер. с нем./Под ред. А. А. Воробьева. М.: Госэнергоиздат, 1960.
7. **Техника** высоких напряжений/Г. Н. Александров, В. Л. Иванов, К. П. Кадомская и др./Под ред. М. В. Костенко. М.: Высшая школа, 1973.
8. **Казариовский Д. М., Тареев Б. М.** Испытание электроизоляционных материалов и изделий. — 3-е изд. Л.: Энергия, 1980.
9. **Справочник** по электротехническим материалам/ Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. — 2-е изд. М.: Энергия. Т. 1, 1974. Т. 2, 1974. Т. 3, 1976.
10. **Электротехнический** справочник/Под ред. В. Г. Герасимова, П. Г. Грудинского, Л. А. Жукова и др. — 6-е изд. Т. 1. М.: Энергия, 1980.
11. **Электротехнические** материалы: Справочник/ В. Б. Березин, Н. С. Прохоров, Г. А. Рыков, А. М. Хайкин. — 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1983.
12. **Справочник** по пластическим массам/Под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, Б. И. Сажина. — 2-е изд. М.: Химия, 1975. Т. 1, Т. 2.
13. **Буц В. П., Железнов М. Т., Юриов М. М.** Вакуумные конденсаторы. Л.: Энергия, 1971.
14. **Сливков И. Н.** Электроизоляция и разряд в вакууме. М.: Атомиздат, 1972.
15. **Бабиков М. А., Комаров Н. С., Сергеев А. С.** Техника высоких напряжений. М.: Госэнергоиздат, 1955.
16. **Долгинов А. И.** Техника высоких напряжений в электроэнергетике. М.: Энергия, 1968.
17. **Техника** высоких напряжений/П. В. Борисоглебский, Л. Ф. Дмоховская, В. П. Ларионов и др./Под ред. Д. В. Разевига. М.: Госэнергоиздат, 1963.
18. **Техника** высоких напряжений/Л. Ф. Дмоховская, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь и др./Под ред. Д. В. Разевига. — 2-е изд. М.: Энергия, 1976.
19. **Казарновский Д. М., Ямапов С. А.** Радиотехнические материалы. М.: Высшая школа, 1972.
20. **Электрорадиоматериалы**/Б. М. Тареев, Н. В. Короткова, В. М. Петров, А. А. Преображенский/Под ред. Б. М. Тареева. М.: Высшая школа, 1978.
21. **Адамчевский И.** Электрическая проводимость жидких диэлектриков: Пер. с польск./Под ред. Г. С. Кучинского. Л.: Энергия, 1972.
22. **Балыгин И. Е.** Электрическая прочность жидких диэлектриков. М.: Энергия, 1964.
23. **Шахнович М. И.** Синтетические жидкости для электрических аппаратов. М.: Энергия, 1972.
24. **Крейн И. Р., Кулакова Р. В.** Нефтяные изоляционные масла. М.: Госэнергоиздат, 1959.
25. **Липштейн Р. А., Шахнович М. И.** Трансформаторное масло. — 2-е изд. М.: Энергия, 1968.
26. **Рение В. Т.** Электрические конденсаторы. — 3-е изд. Л.: Энергия, 1969.
27. **Энциклопедия полимеров.** М.: Советская энциклопедия, 1972. Т. 1 (А—К); 1974. Т. 2. (Л — Полинозные волокна); 1977. Т. 3 (Полиоксадиазолы — Я).
28. **Поливинилхлоридные** пластикаты и их применение в кабельной технике/Ю. Н. Ван-Гаут, Ю. М. Котт, Ю. В. Ляхов, И. Д. Троицкий/Под ред. И. Д. Троицкого. М.: Энергия, 1978.
29. **Барановский В. В., Дулицкая Г. М.** Слоистые пластики электротехнического назначения. М.: Энергия, 1976.
30. **Гладков А. З.** Электроизоляционные лаки и компаунды. М.: Энергия, 1973.
31. **Вариконды** в электронных импульсных схемах/ В. Ю. Булыбенко, Т. Н. Вербицкая, В. Ф. Анципарович и др./Под ред. В. Ю. Булыбенко. М.: Советское радио, 1971.
32. **Пасынков В. В.** Материалы электронной техники. М.: Высшая школа, 1980.
33. **Смажевская Е. Г., Фельдман Н. Б.** Пьезоэлектрическая керамика. М.: Советское радио, 1971.
34. **Глозман И. А.** Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972.

Глава 24

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Н. А. Бабушкина

Термоэлектрические явления — группа физических явлений (Зеебека, Пельтье и Томсона), обусловленных существованием взаимосвязи между тепловыми и электрическими процессами в проводниках.

Эффект Зеебека состоит в том, что в электрической цепи из разнородных металлов возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС) E_{12}, если места контактов поддерживаются при разных температурах T_1 и T_2.

Термо-ЭДС E_{12} зависит только от температур T_1 и T_2 соединенных проводников и от природы материалов, составляющих термоэлемент. По значению E_{12} оценивают температуру в месте спая. В небольшом интервале температур имеет место зависимость $E_{12}=S_{12}(T_1-T_2)$, где S_{12} — коэффициент термо-ЭДС, определяемый природой материалов термоэлемента и интервалом температур, в котором он применяется. Коэффициент S_{12} может резко меняться с температурой (и даже менять знак).

Измеряемые термо-ЭДС относятся всегда к паре металлов и поэтому не являются характеристиками отдельных металлов. В таблицах обычно приводят термо-ЭДС материалов по отношению к свинцу, платине или меди.

Эффект Пельтье состоит в том, что при прохождении тока через спай различных проводников кроме джоулева тепла выделяется или поглощается в зависимости от направления тока некоторое количество тепла $Q_П$, пропорциональное протекающему через контакт заряду (т. е силе тока I и времени t),

$$Q_П = \Pi I t,$$

где Π — коэффициент Пельтье, который зависит от природы находящихся в контакте материалов (см. табл. 24.6)

Эффект Пельтье так же, как эффект Зеебека, можно наблюдать лишь при наличии двух разнородных проводников.

Эффект Томсона заключается в обратимом выделении (или поглощении) теплоты в однородном проводнике, по которому протекает электрический ток, при одновременном наличии параллельного току градиента температуры:

$$Q_\mu = \mu (T_2 - T_1) I t,$$

где μ — коэффициент Томсона, зависящий от природы материала (см. табл. 24.7); I — ток; t — время.

В противоположность явлениям Зеебека и Пельтье эффект Томсона относится к одному однородному проводнику, поэтому коэффициент μ для любого проводника может быть определен независимо.

Согласно термодинамической теории коэффициенты Томсона μ, Зеебека S и Пельтье Π связаны соотношениями Кельвина:

$$\mu = T\frac{dS}{dT};\quad \Pi = ST.$$

По известной зависимости коэффициента Томсона от температуры можно рассчитать коэффициенты термо-ЭДС и Пельтье отдельных металлов — так называемые абсолютные коэффициенты термо-ЭДС и Пельтье металлов:

$$S = \int_0^T \frac{\mu}{T}\,dT.$$

Дифференциальная термо-ЭДС пары металлов представляется в виде разности абсолютных значений термо-ЭДС отдельных металлов:

$$S_{1\ 2} = S_1 - S_2.$$

Абсолютная термо-ЭДС металла при низкой температуре может быть измерена, если составить термопару из металла и сверхпроводника, так как дифференциальная термо-ЭДС в этом случае создается только ее нормальной ветвью.

Абсолютная термо-ЭДС свинца (табл. 24.1), полученная таким образом Кристиан [1], является общепризнанным стандартом, используемым для всех термоэлектрических измерений Значения абсолютной термо-ЭДС свинца, приведенные в более поздней работе Робертса [2], отличаются от данных Кристиан при температуре выше 20 К (табл. 24.1).

При высоких температурах «стандартами» могут также служить благородные металлы: медь, серебро, зо-

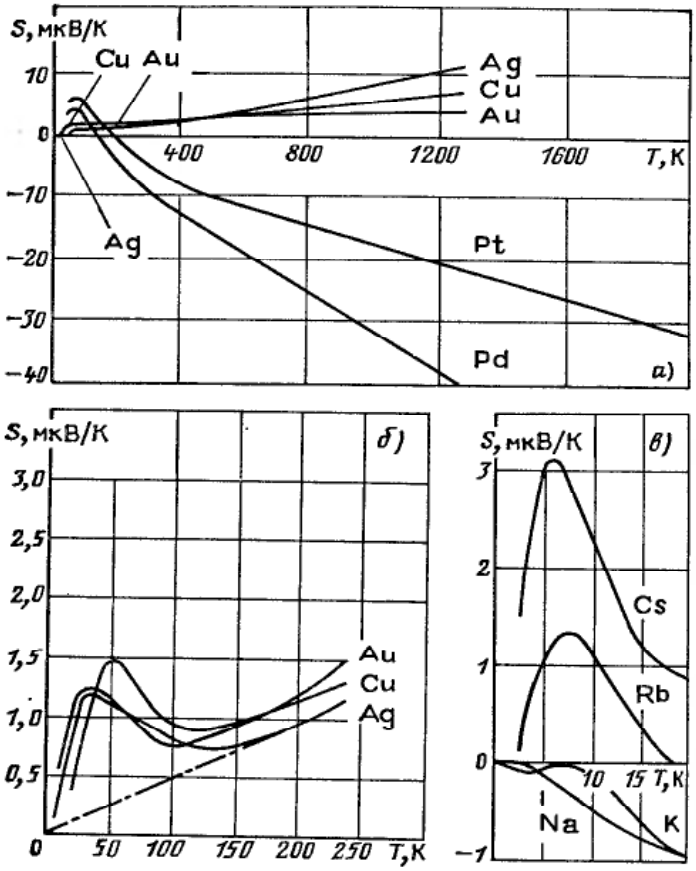


Рис. 24.1. Абсолютная термо-ЭДС металлов:

а — тугоплавких и благородных в области температур выше 300 К [5]; *б* — меди, серебра и золота при температурах от 0 до 250 К [7]; *в* — щелочных металлов при низких температурах [7]

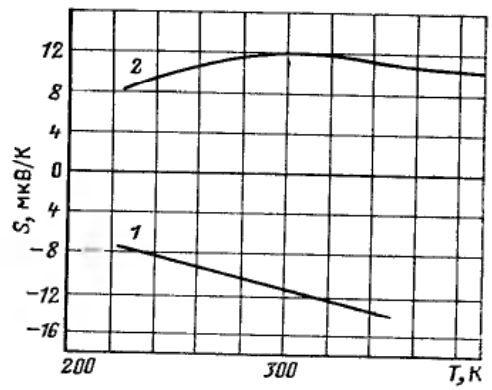


Рис. 24.2. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС щелочных металлов:

1 — обобщенная кривая для натрия, калия и рубидия; *2* — для лития [8]

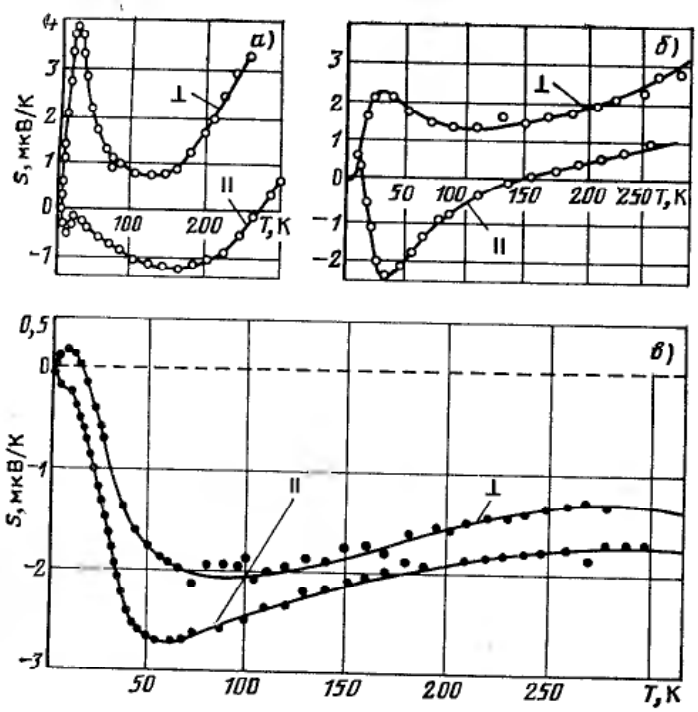


Рис. 24.3. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС кадмия (*а*), цинка (*б*) и магния (*в*) в параллельном (||) и перпендикулярном (⊥) гексагональным осям направлениях [9]

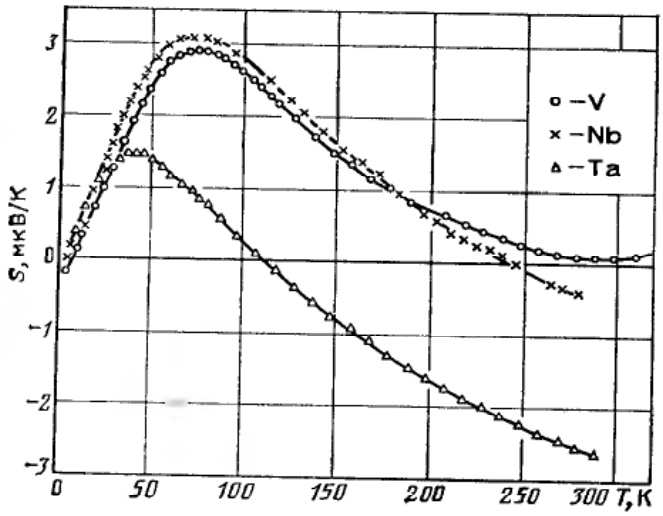


Рис. 24.4. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС ванадия, ниобия и тантала [10]

лото (табл. 24.2). Их следует предпочесть переходным металлам — платине или вольфраму, значения абсолютных термо-ЭДС которых значительно больше.

В табл. 24.3 и 24.4 представлены значения термо-ЭДС переходных металлов. В табл. 24.5 приведены дифференциальные термо-ЭДС металлов отиосительно платины. На рис. 24.1—24.12 приведены температурные зависимостн абсолютных термо-ЭДС для ряда металлов.

Цифры, приводимые в таблицах, следует считать не абсолютно точными, а лишь наиболее заслуживающими доверия, так как термо-ЭДС материала чувствительна к ничтожному количеству примесей, к ориентации кри-

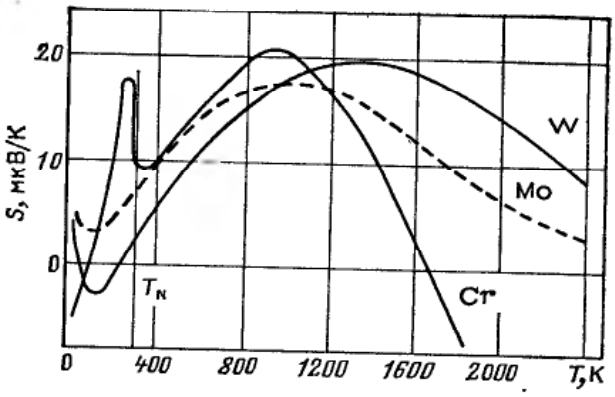


Рис. 24.5. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС вольфрама, молибдена и хрома [8]; T_N — точка Нееля для хрома

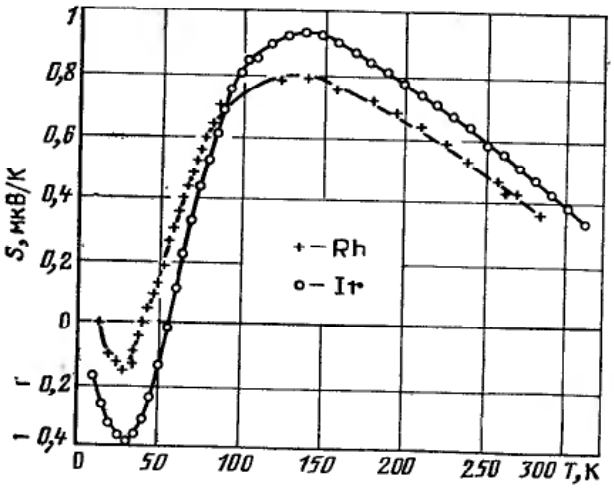


Рис. 24.6. Температуриая зависимость абсолютной термо-ЭДС родия и иридия [10]

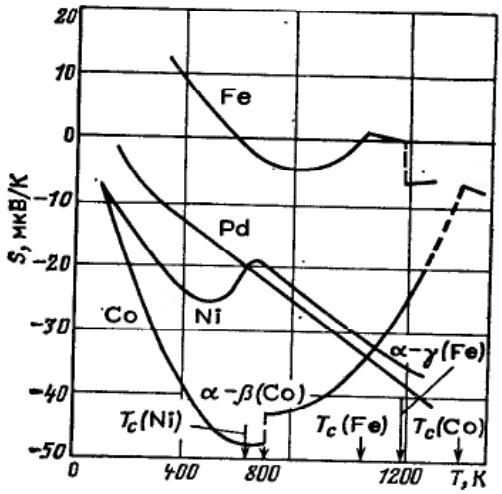


Рис. 24.7. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС никеля, железа, палладия и кобальта [11]:
T_C — точка Кюри; α—β, α—γ — точки структурных переходов кобальта и железа

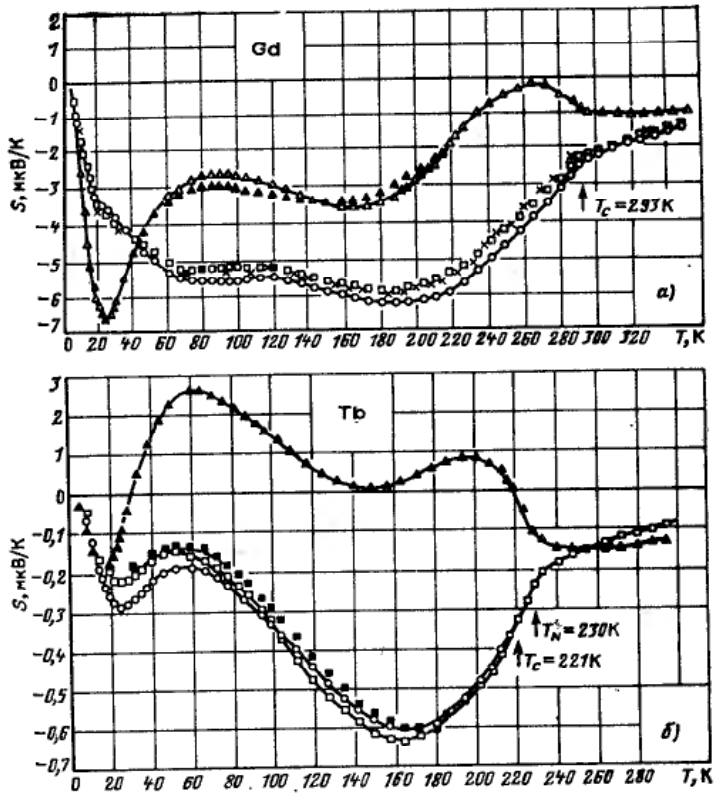


Рис. 24.8. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС монокристаллов:

а — гадолиния [12] (○ — в базисной плоскости, △ — по оси *c*, ▲ — по оси *c* при B=0,1 Тл, □ — в плоскости *a*—*c*, 17° от оси *a*); *б* — тербия [12] (○ — по оси *a*, □ — по оси *b*, ▲ — по оси *c*, ■ — по оси *b* при B=0,13 Тл)

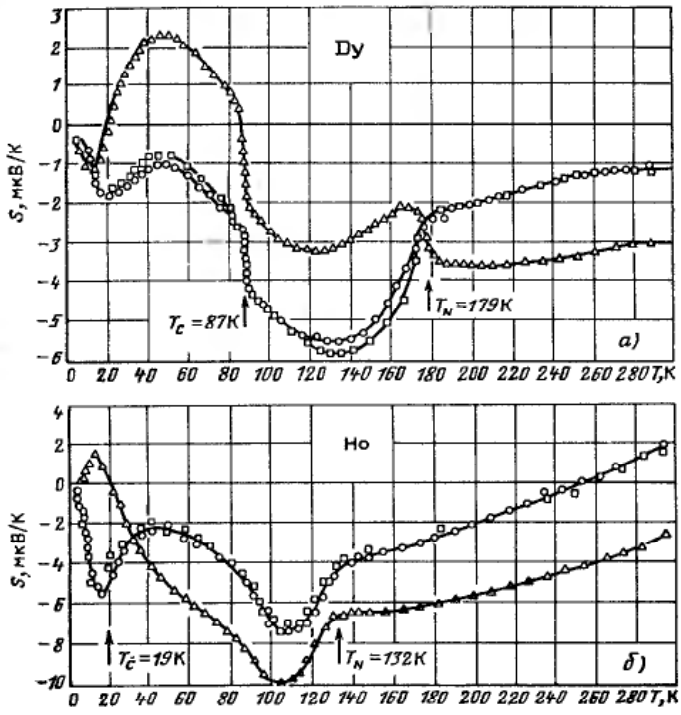


Рис. 24.9. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС монокристаллов диспрозия (*а*) и гольмия (*б*) [12]:

○ — по оси *a*; □ — по оси *b*; △ — по оси *c*

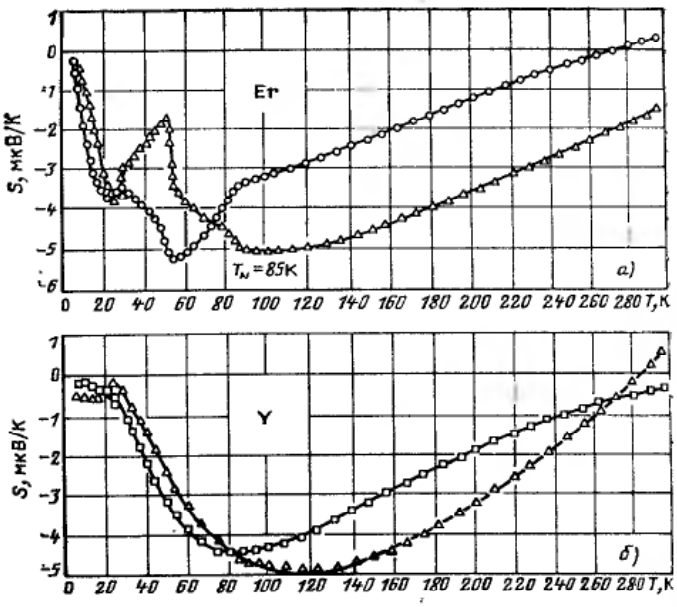


Рис. 24.10. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС монокристаллов эрбия (*а*) и иттрия (*б*) [12]:

○ — в базисной плоскости; △ — по оси *c*

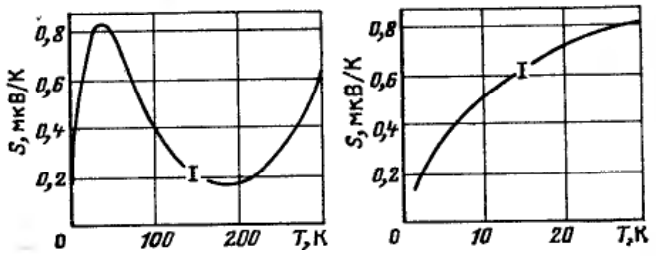


Рис. 24.11. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС манганина [13] (Cu — 82,2%, Mn — 13,3%, Ni — 4,5%)

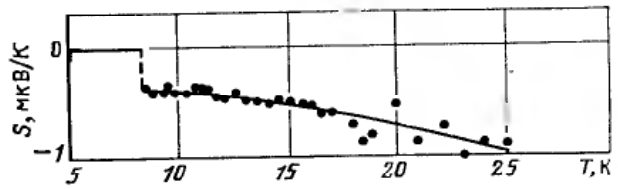


Рис. 24.12. Температурная зависимость абсолютной термо-ЭДС сверхпроводящего сплава Nb — 48%, Ti — 52% ($T_{кр}$=9 К) [14]

сталлических зерен, термической или даже холодной обработке материала. По этой причине термо-ЭДС может возникнуть (при наличии температурных перепадов) в цепи, состоящей из одного и того же материала, если различные участки цепи подвергались различной технологической обработке. При сравнении значений S материалов, измеренных разными исследователями, могут выявляться расхождения порядка 10%.

Градуировочные таблицы термопар см. в гл. 8.

Наиболее полные теоретические и экспериментальные данные по термоэлектрическим явлениям представлены в [3].

Обобщенные данные о составе, физико-химических и метрологических свойствах применяемых в настоящее время сплавов для термопар см. в [4].

Таблица 24.1. **Абсолютная термо-ЭДС чистого свинца по данным Кристиан [1] и Робертса [2]**

T, К	$S_{Кр}$, мкВ/К	$S_{Роб}$, мкВ/К	T, К	$S_{Кр}$, мкВ/К	$S_{Роб}$, мкВ/К
7,25	—0,204	—0,204	40,0	—0,764	—0,575
7,5	—0,221	—0,220	42,0	—0,766	—0,564
8,0	—0,257	—0,226	44,0	—0,768	—0,555
8,5	—0,297	—0,298	46,0	—0,770	—0,548
9,0	—0,343	—0,343	48,0	—0,772	—0,542
9,5	—0,390	—0,388	50,0	—0,774	—0,537
10,0	—0,434	—0,433	55,0	—0,777	—0,530
10,5	—0,475	—0,476	60,0	—0,779	—0,527
11,0	—0,516	—0,517	65,0	—0,782	—0,528
11,5	—0,556	—0,556	70,0	—0,784	—0,531
12,0	—0,593	—0,593	80,0	—0,794	—0,544
12,5	—0,628	—0,627	90,0	—0,824	—0,562
13,0	—0,658	—0,657	100,0	—0,865	—0,583
13,5	—0,683	—0,684	110,0	—0,899	—0,606
14,0	—0,706	—0,707	120,0	—0,927	—0,631
14,5	—0,728	—0,728	130,0	—0,952	—0,656
15,0	—0,746	—0,745	140,0	—0,980	—0,682
15,5	—0,760	—0,759	150,0	—1,010	—0,708
16,0	—0,771	—0,770	160,0	—1,034	—0,734
16,5	—0,777	—0,777	170,0	—1,054	—0,760
17,0	—0,781	—0,782	180,0	—1,075	—0,785
18,0	—0,785	—0,786	190,0	—1,098	—0,810
19,0	—0,785	—0,784	200,0	—1,120	—0,834
20,0	—0,784	—0,779	210,0	—1,143	—0,858
21,0	—0,783	—0,771	220,0	—1,161	—0,882
22,0	—0,782	—0,760	230,0	—1,175	—0,904
23,0	—0,781	—0,748	240,0	—1,191	—0,927
24,0	—0,780	—0,735	250,0	—1,205	—0,948
25,0	—0,779	—0,721	260,0	—1,224	—0,969
26,0	—0,778	—0,707	270,0	—1,243	—0,989
27,0	—0,777	—0,694	280,0	—1,259	—1,009
28,0	—0,776	—0,681	290,0	—1,271	—1,028
29,0	—0,775	—0,669	300,0	—	—1,047
30,0	—0,774	—0,657	310,0	—	—1,065
32,0	—0,772	—0,636	320,0	—	—1,084
34,0	—0,770	—0,617	330,0	—	—1,101
36,0	—0,768	—0,601	340,0	—	—1,119
38,0	—0,766	—0,587	350,0	—	—1,136

Таблица 24.2. **Абсолютная термо-ЭДС для некоторых металлов [5] в интервале температур от 100 до 2400 К, значения основаны на данных Pb [1]**

T, К	S, мкВ/К						
	Cu	Ag	Au	Pt	Pd	W	Mo
100	1,19	0,73	0,82	4,29	2,00	—	—
150	1,12	0,85	1,02	1,32	—1,63	—	—
200	1,29	1,05	1,34	—1,27	—4,85	—	—
273	1,70	1,33	1,79	—4,45	—9,00	—	—
300	1,83	1,51	1,94	—5,28	—9,99	1,07	5,57
400	2,34	2,08	2,46	—7,83	—13,00	4,44	8,52
500	2,83	2,82	2,86	—9,89	—16,03	7,53	11,12
600	3,33	3,72	3,18	—11,66	—19,06	10,29	13,27
700	3,83	4,72	3,43	—13,31	—22,09	12,66	14,94
800	4,34	5,77	3,63	—14,88	—25,12	14,65	16,13
900	4,85	6,85	3,77	—16,39	—28,15	16,28	16,86
1000	5,36	7,95	3,85	—17,86	—31,18	17,57	17,16
1100	5,88	9,06	3,88	—19,29	—34,21	18,53	17,08
1200	6,40	10,15	3,86	—20,69	—37,24	19,18	16,65
1300	6,91	—	3,78	—22,06	—40,27	19,53	15,92
1400	—	—	—	—23,41	—43,30	19,60	14,94
1600	—	—	—	—26,06	—49,36	18,97	12,42
1800	—	—	—	—28,66	—55,42	17,41	9,52
2000	—	—	—	—31,23	—61,48	15,05	6,67
2200	—	—	—	—	—	12,01	4,30
2400	—	—	—	—	—	8,39	2,87

Таблица 24.3. **Значения S для чистых переходных металлов при температуре ниже комнатной, мкВ/К [3] (основаны на данных для Pb [1])**

Элемент	Термо-ЭДС при температуре, К								
	10	20	50	80	100	150	200	250	273
Группа IIIB									
Sc	—1,6	—3,0	—8,0	—12,7	—14,0	—15,6	—16,3	—16,5	—16,2
Y*1	—0,3	—0,4	—3,3	—4,5	—4,4	—3,1	—1,9	—0,9	—0,7
	—0,5	—0,4	—2,8	—4,5	—4,9	—4,5	—3,2	—1,4	—0,5
La	—	—	—	—	+0,3	+0,4	+0,7	+1,0	+1,3
Группа IVB									
Ti	—	—	—3,0	—3,0	—2,6	0	+2,0	+4,0	+4,5
Zr	—	—	0	+3,0	+4,5	+7,5	+8,5	+9,5	+9,5
Hf	—	—	—	0	0	+2,5	+3,7	+4,7	+5,3

Элемент	Термо-ЭДС при температуре, К								
	10	20	50	80	100	150	200	250	273
					Группа VB				
V*2	+0,19	+0,76	+2,45	+2,91	+2,65	+1,52	+0,72	+0,26	+0,13
Nb*2	+0,31	+0,98	+2,73	+3,09	+3,13	+1,42	+0,65	—0,04	—0,20
Ta*2	+0,36	+1,03	+1,41	+0,78	0	—0,8	—1,5	—2,0	—2,2
					Группа VIB				
Cr*3	+3,1	+6,7	+8,2	+5,0	+5,0	+7,0	+11,8	+17,5	+18,8
Mo*3	—0,02	—0,11	—0,48	—0,2	+0,1	+0,94	+2,50	+4,08	+4,57
W*3	+0,05	—0,28	—2,78	—3,70	—4,04	—2,45	—1,41	—0,10	+0,56
					Группа VIIB				
Mn	—	+12,5	+15,5	+6	—2,5	—7,0	—8,5	—9,7	—10,0
Tc	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Re	+0,61	+1,32	+1,18	+0,08	—0,66	—2,21	—3,51	4,63	—5,03
					Группа VIII				
Fe*4	+1,0	+2,5	+8,0	+12,0	+13,0	+16,0	+17,0	+15,5	+15,0
Ru	—	—	—	+0,2	0	—1,1	—1,5	—1,5	—1,5
Os	—	—	—	—2,2	—3,2	—3,8	—4,0	—4,0	—4,0
Co*4	—	—0,5	—1,0	—3,0	—4,0	—9,0	—12,0	—18,0	—19,0
Rh*5	—0,19	—0,33	—0,11	+0,54	+0,78	+0,92	+0,75	+0,58	+0,48
Ir*5	—	—0,11	+0,13	+0,57	+0,73	+0,77	+0,64	+0,46	+0,35
Ni*4	—2,0	—4,7	—7,2	—8,1	—11,0	—11,0	—13,5	—17,0	—18,0
Pd*4	+0,4	+1,6	+4,3	+3,7	+2,00	—1,63	—4,85	—7,42	—9,00
Pt	+0,6	+2,3	+5,8	+5,5	+4,29	+1,82	—1,27	—3,28	—4,45

*1 В числителе данные для баисной плоскости, в знаменателе — вдоль оси *c*.
*2 См. также рис. 24.4 [9].
*3 См. также рис. 24.5 [7].
*4 См. также рис. 24.7 [10].
*5 См. также рис. 24.6 [9].

Таблица 24.4. **Области линейной зависимости термо-ЭДС переходных металлов [3, 8]**

Элемент	Температурный интервал линейности, К	Диапазон изменения термо-ЭДС, мВ
	Группа IIIB	
Sc	150—500	—7,2÷—5
	750—1400	—5÷9
La	300—583	—2÷2,3
	Группа IVB	
Ti	400—800	3÷—5
Zr	400—800	7,5÷—5
	900—1400	—6÷2
Hf	500—1000	8—0
	Группа VB	
V	500—1100	1—6
Nb	600—1400	—1,5÷6
Ta	1100—1800	—2÷9
	Группа VIB	
Cr	500—800	10—12
Mo	300—600	6—13
	1200—2100	1,6—7
W	200—300	—2÷2,5
	1800—2400	17—8
	Группа VIIB	
Mn	300—1000	—10÷—4
Re	450—1500	—7÷—1
	Группа VIIIB	
Fe	300—700	12÷—5
Ru	500—1800	—2÷—9,5
Os	600—1800	—3,8÷—10
Co	100—500	—5÷—46
	1400—1600	—8÷—8,5
Rh	600—1700	0,5÷—0,8
Ir	300—1300	1÷—0,4
	1400—1800	—4,5÷—9
Ni	200—500	—15÷—2,5
	600—1500	—20÷40
Pd	300—1800	—10÷—30
Pt	400—2000	—8÷55

Таблица 24.5. **Значения термо-ЭДС материалов (мВ) относительно платины для различных температур в градусах шкалы МПТШ-68** [6]

Температура свободных концов термопары 273 К. Положительный знак термо-ЭДС металла соответствует току через спай термопары, идущему от платины к этому металлу.

Материал	Температура, К									
	73	173	373	473	673	873	1073	1273	1473	1673
Элементы										
Алюминий	0,45	0,06	0,42	1,06	2,84	5,15	—	—	—	—
Висмут	—0,04	—0,31	0,90	2,35	—	—	—	—	—	—
Вольфрам	0,43	—0,15	1,12	2,62	6,70	12,26	19,25	27,73	37,72	—
Германий	—44,00	—26,62	33,9	72,4	82,3	43,9	—	—	—	—
Золото	—0,21	—0,39	0,78	1,84	4,63	8,12	12,26	17,05	—	—
Индий	—	—	0,69	—	—	—	—	—	—	—
Иридий	—0,25	—0,35	0,65	1,49	3,55	6,10	9,10	12,57	16,45	20,47
Кадмий	—0,04	—0,31	0,90	2,35	—	—	—	—	—	—
Калий	1,61	0,78	—	—	—	—	—	—	—	—
Кальций	—	—	—0,51	—1,13	—	—	—	—	—	—
Кобальт	—	—	—1,33	—3,08	—7,24	—11,28	—13,99	—14,21	—	—
Кремний	63,13	37,17	—41,56	—80,57	—	—	—	—	—	—
Литий	—1,12	—1,00	1,82	—	—	—	—	—	—	—
Магний	0,37	—0,09	0,44	1,10	—	—	—	—	—	—
Медь	—0,19	—0,37	0,76	1,83	4,68	8,34	12,81	18,16	—	—
Молибден	—	—	1,45	3,19	7,57	13,13	19,83	27,74	36,96	—
Натрий	1,00	—0,29	—	—	—	—	—	—	—	—
Никель	2,28	1,12	—1,48	—3,10	—5,45	—7,04	—9,83	—12,11	—	—
Олово	0,26	—0,12	0,42	1,07	—	—	—	—	—	—
Палладий	0,81	0,48	—0,57	—1,23	—2,82	—5,03	—7,96	—11,61	—15,86	—20,40
Родий	—0,20	—0,34	0,70	1,61	3,91	6,77	10,14	14,02	18,39	22,99
Рубидий	1,09	0,46	—	—	—	—	—	—	—	—
Ртуть	—	—	—0,60	—1,33	—	—	—	—	—	—
Свинец	0,24	—0,13	0,44	1,09	—	—	—	—	—	—
Серебро	—0,21	—0,39	0,74	1,77	4,57	8,41	13,33	—	—	—
Сурьма	—	—	4,89	10,14	20,53	28,87	—	—	—	—
Таллий	—	—	0,58	1,30	—	—	—	—	—	—
Тантал	0,21	—0,10	0,33	0,93	2,91	5,95	10,02	15,15	21,37	—
Торий	—	—	—0,13	—0,26	—0,50	—0,45	0,22	1,72	4,03	—
Углерод	—	—	0,70	1,54	3,72	6,79	10,98	16,46	—	—
Церий	0,22	—0,13	—	—	—	—	—	—	—	—
Цинк	—0,07	—0,33	0,76	1,89	5,29	—	—	—	—	—
Материалы для термопар										
Алюмель (94% Ni+2% Al++2% Si+2% Mn)	—2,39	1,29	—1,29	—2,17	—3,64	—5,28	—7,07	—8,78	—10,33	—11,72
Хромель (90% Ni+10% Cr)	—3,36	—2,20	2,81	5,96	12,75	19,61	26,20	32,47	38,48	44,04
Константан (60% Cu+40% Ni)	5,35	2,98	—3,51	—7,45	—16,19	—25,46	—34,81	—43,85	—	—
Сплавы										
Манганин (84% Cu+4% Ni++12% Mn)	—	—	0,61	1,55	4,25	7,84	—	—	—	—
Нихром (80% Ni++20% Cr)	—	—	1,14	2,62	6,25	10,53	15,41	20,87	—	—
Ферронихром (60% Ni+24% Fe++16% Cr)	—	—	0,85	2,01	5,00	8,68	13,03	18,06	—	—
Бронза бериллиевая (98% Cu+2% Be)	—	—	0,67	1,26	4,19	—	—	—	—	—
Бронза фосфористая (85% Cu+13% Sn+1,86% Zn++0,16% Pb++0,013% P)	—	—	0,55	1,34	3,50	6,30	—	—	—	—

Таблица 24.6. **Значения коэффициента Пельтье для различных пар металлов [15]**

Железо — константан		Медь — никель		Свинец — константан	
T, К	Π, мВ	T, К	Π, мВ	T, К	Π, мВ
273	13	292	8,0	293	8,7
293	15	328	9,0	383	11,8
403	19	478	10,3	508	16,0
513	26	563	8,6	578	18,7
593	34	613	8,0	633	20,6
833	52	718	10,0	713	23,4

Примечание. Медь — константан: $\Pi = 11{,}0$ мВ при $T = 293$ К.

Таблица 24.7. **Значения коэффициента Томсона для различных металлов [15]**

Металл		T, К	μ, мкВ/К
Ag		105	−0,10
		150	+0,55
		300	+1,31
Al (99 %)		260	+0,11
		300	−0,08
		400	−0,56
Au		105	+0,29
		150	+0,96
		300	+1,61
Cd (монокристалл)	∥ *	373	+6,9
		473	+7,3
	⊥ 2*	373	+8,2
		473	+8,7
Co		100	−8,4
		200	−19,6
		300	−25,4
Cu		70	−0,26
		170	+0,47
		300	+1,52
Cu + 0,37% Au		20	+0,44
		40	+2,17
		60	+2,96
		90	+2,20
		130	+1,71
		300	+2,33
Fe (армко)		323	−15,3
		423	−22,8
		523	−26,3

Продолжение табл. 24.7

Металл		T, К	μ, мкВ/К
Ni		100	−4,5
		200	−12,1
		260	−15,7
Pb (99,99%)		120	−0,19
		200	−0,45
		400	−0,85
Pd		20	+1,9
		100	−7,8
		200	−12,1
		300	−18,2
Pt		203	−9,6
		273	−9,1
		393	−9,2
Sn (99,99%)		100	+0,86
		200	+0,42
		300	−0,07
		400	−0,45
Zn (монокристалл)	∥ *	322,5	+1,6
		398	+4,6
	⊥ 2*	322,5	+4,1
		398	+8,8
W		328	+8,5
Константан		323	−24,6
		384	−25,5
		446	−26,0
Нейзильбер		328	−12,0

*1 ∥ — образец вырезан вдоль гексагональной оси кристалла (томсон-эффект измеряется вдоль образца).
*2 ⊥ — образец вырезан под углом 90° к гексагональной оси кристалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chistian J. W., Jan J.-P., Preason W. B., Templeton I. M.**//Proc. Roy. Soc. Lond. 1958. Vol. A245. P. 213—221.
2. **Roberts R. B.**//Phil. Mag. 1977. Vol. 36, № 1. P. 91—107.
3. **Блатт Ф. Д.** Термоэлектродвижущая сила металлов: Пер. с англ./Под ред. Д. К. Белащенко. М.: Металлургия, 1980.
4. **Рогельберг И. Л., Бейлин В. М.** Сплавы для термопар: Справочник. М.: Металлургия, 1983.
5. **Cusack N., Kendall P.**//Proc. Phys. Soc. 1958. Vol. 72. P. 898—893.

6. **Physics** Vade Mecum AIP 50th Anniversary/Ed. Herbert L. Anderson N. Y., AIP, 1981.

7. **Mac Donald D. K. C.** Thermoelectricity: An Introduction to the Principles. N. Y.: John Wiley and Sons, 1962.

8. **Vedernikov M. N., Burkov A. T.** Present state of experimental knowledge on thermopower of metals at high temperatures adove 77 K.: Thermoelectricity in Metallic Conductors/Ed. F. J. Blatt. N. Y. Lond.: Plenum Press, 1978.

9. **Rowe V. A., Schroeder P. A.**//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31. P. 1—8.

10. **Carter R., Davidson A., Schroeder P. A.**//J. Phys. Chem. Solids. 1970. Vol. 31, № 10. P. 2374—2376.

11. **Greig D.** Thermoelectricity in transition metals.— Thermoelectricity in Metallic Conductors/Ed. F. J. Blatt. N. Y. — Lond., Plenum Press, 1978.

12. **Sill L. R., Legvold S.**//Phys. Rev. 1965. Vol. 137, № 4A. P. 1139—1145.

13. **Rathanayaka K. D. D.**//J. Phys. E. Sci. Instrum. 1985. Vol. 18, № 5. P. 380—382.

14. **Harmans C.**//Cryogenics. 1982. Vol. 22, N 1. P. 39—40.

15. **Landold-Börnstein.** Zahlenwerde und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, 6 Teil, Elektrische Eigenschaften. Berlin, Göttingen-Heidelberg: Springer-Verlag, 1959.

Глава 25
ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ЭМИССИЯ

Т. М. Лифшиц, А. Л. Мусатов

25.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Электронная и ионная эмиссия — испускание электронов или ионов телами под влиянием внешних воздействий: нагревания, потока фотонов, электронов, ионов или сильного электрического поля. В зависимости от характера внешнего воздействия различают соответственно термоэлектронную, термоионную, фотоэлектронную, вторичную электронную и вторичную ионную, электронно-ионную, ионно-электронную и полевую (иначе — туннельную или автоэлектронную) эмиссии. Во всех видах эмиссии, кроме полевой, роль внешних воздействий состоит в увеличении энергии части электронов или ионов тела до значения, позволяющего преодолеть действие сил, которые связывают их с телом, и выйти в вакуум или в другую среду. При ионной эмиссии эмитироваться могут как положительные, так и отрицательные ионы.

Тело, испускающее электроны или ионы, называется *эмиттером.* Для наблюдения и использования электронной или ионной эмиссии необходимо создать у поверхности эмиттера электрическое поле, отсасывающее эмитированные частицы. Обычно для достижения эмиссионным током насыщения достаточно приложить небольшое поле (десятки или сотни вольт на сантиметр). В случае полевой эмиссии внешнее электрическое поле превращает потенциальный порог, существующий на границе тела и препятствующий выходу электронов, в барьер конечной ширины и уменьшает его высоту, вследствие чего становится возможным квантовомеханическое туннелирование электронов сквозь барьер. При этом энергия электрического поля затрачивается только на ускорение эмитированных электронов. Для возникновения полевой эмиссии необходимо приложить к телу сильное электрическое поле ($\mathscr{E} \sim 10^7$ В/см), при этом плотность тока может достигнуть 10^7 А/см^2. При еще бо́льшнх импульсных полях локальные участки эмиттера (выступы, заострения) сильно разогреваются (чаще всего током полевой эмиссии) и взрываются. Часть вещества эмиттера переходит из конденсированной фазы в плотную плазму. Этот процесс сопровождается испусканием интенсивного электронного потока — возникает взрывная электронная эмиссия. Монографии и обзоры по эмиссионной электронике и различным видам эмиттеров приведены в [1—4, 7, 12, 14—17, 27—30, 34].

25.2. РАБОТА ВЫХОДА

Важнейшей эмиссионной характеристикой твердых тел является *работа выхода* $e\varphi$ (e — заряд электрона, φ — потенциал), равная минимальной энергии, которая необходима для перемещения электрона с поверхности Ферми в теле в вакуум, в точку пространства, где напряженность электрического поля практически равна нулю [1]. Если отсчитывать потенциал от уровня, соответствующего покоящемуся электрону в вакууме, то φ — потенциал внутри кристалла, отвечающий уровню Ферми. Согласно современным представлениям в поверхностный потенциальный барьер, при преодолении которого и совершается работа выхода, основной вклад вносят обменные и корреляционные эффекты, а также — в меньшей степени — электрический двойной слой у поверхности тела. Наиболее распространенные методы экспериментального определения работы выхода — эмиссионные: по температурной, спектральной или полевой зависимости соответственно термо- фото- или полевой эмиссии, а также по измерению контактной разности потенциалов между исследуемым телом и другим телом (анодом), работа выхода которого известна [1, 2]. В табл. 25.1, 25.3 и 25.4 приведены значения работы выхода простых веществ и некоторых соединений. Внешнее электрическое поле уменьшает работу выхода (эффект Шоттки). Если поверхность эмиттера однородна, то уменьшение работы выхода, эВ, при наложении электрического поля напряженностью $\mathscr{E}$, В/см, равно

$$\Delta(e\varphi) = e^3\mathscr{E}^{1/2} = 3{,}79 \cdot 10^{-4}\,\mathscr{E}^{1/2}.$$

Тонкие слои адсорбнрованных щелочных и щелочноземельных металлов на поверхности тел существенно снижают работу выхода. Особенно сильно уменьшается работа выхода металлов и полупроводников при адсорбции на их предварнтельно очищенных поверхностях слоев цезия, бария и их оксидов. Углерод и кислород при адсорбции на поверхности тел, как правило, увеличивают их работу выхода (табл. 25.2, рис. 25.1 и 25.2).

Таблица 25.1. Работа выхода простых веществ (в круглых скобках приведены кристаллографические индексы граней) [2]

Элемент	$e\varphi$, эВ	
	Поликристалл [2]	Монокристалл [3]
Алюминий	4,25	4,41 (100) 4,06 (110) 4,24 (111)
Барий	2,49	—
Бериллий	3,92	—
Бор	4,5	—
Ванадий	4,12	—
Висмут	4,4	—
Вольфрам	4,54	4,63 (100) 5,25 (110) 4,47 (111) 4,18 (113) 4,30 (116)
Гадолиний	3,1	—
Галлий	3,96	—
Гафний	3,53	—
Германий	4,76	4,80 (111)
Гольмий	3,22	—
Диспрозий	3,25	—
Европий	2,5	—
Железо	4,31	4,67 (100)
	4,70α	4,81 (111)
	4,62β	—
	4,68γ	—
Золото	5,1[3]	5,47 (100) 5,37 (110) 5,31 (111)
Индий	3,8	—
Иридий	5,27[3]	5,42 (110) 5,76 (111) 5,67 (100) 5,00 (210)
Иттрий	3,3	—
Кадмий	4,1	—
Калий	2,22	2,39 (110)
Кальций	2,80	—
Кобальт	4,41	—
Кремний	4,8	4,85 (100)*1 4,91 (100)*2 4,60 (111)*2
Лантан	3,3	—
Литий	2,38	—
Лютеций	3,33	—
Магний	3,64	—
Марганец	3,83	—
Медь	4,40	4,59 (100) 4,48 (110) 4,98 (111) 4,53 (112)
Молибден	4,3	4,53 (100) 4,95 (110) 4,55 (111) 4,36 (112) 4,50 (114)
Мышьяк	3,75[3]	4,55 (332)
Натрий	2,35	—
Неодим	3,2	—
Никель	4,50	5,22 (100) 5,04 (110) 5,35 (111)

Продолжение табл. 25.1

Элемент	$e\varphi$, эВ	
	Поликристалл [2]	Монокристалл [3]
Ниобий	3,99	4,02 (001) 4,87 (110) 4,36 (111) 4,63 (112) 4,29 (113) 3,95 (116) 4.18 (310)
Олово	4,38	—
Осмий	4,7	—
Палладий	4,8	5,6 (111)
Платина	5,32	5,7 (111)
Празеодим	2,7	—
Рений	5,0	5,75 (1011)
Родий	4,75	—
Ртуть	4,52	—
Рубидий	2,16	—
Рутений	4,60	—
Самарий	2,7	—
Свинец	4,0	—
Селен	4,72	—
Серебро	4,3	4,64 (100) 4,52 (110) 4,74 (111)
Скандий	3,3	—
Стронций	2,35	—
Сурьма	4,08	4,7 (100)
Таллий	3,7	
Тантал	4,12	4,15 (100) 4,80 (110) 4,00 (111)
Теллур	4,73	—
Тербий	3,15	—
Титан	3,95	—
Торий	3,30	—
Тулий	3,10	—
Углерод	4,7	—
Уран	3,3	3,73 (100) 3,90 (110) 3,67 (113)
Хром	4,58	—
Цезий	1,81	—
Церий	2,7	—
Цинк	4,24	4,9 (0001)
Цирконий	3,9	—
Эрбий	3,25	—

*1 n-Тип.
*2 p-Тип.

Таблица 25.2. Работа выхода поликристаллических простых веществ, покрытых оптимальным слоем адсорбата [2]. Вещества расположены по латинскому алфавиту

Вещество — адсорбат	$e\varphi$, эВ	Вещество — адсорбат	$e\varphi$, эВ
Ag—O, Cs	1,0—1,2	Au—C	4,05
Ag—Ba	1,56	Au—O	5,66
Ag—Cs	1,65	Be—Cs	1,94
Au—Cs	1,8	C—Cs	1,37
Au—Ba	2,3	Ce—Ba	2,2
		Cr—Cs	1,71

Продолжение табл. 25.2

Вещество — адсорбат	$e\varphi$, эВ	Вещество — адсорбат	$e\varphi$, эВ
Cu—Cs	1,64	Pt—O	6,55
Cu—Ba	3,35	Re—Cs	1,4—1,51
Fe—Cs	1,82	Re—K	1,72*
Hf—Ba	2,3—2,4	Re—Y	2,38
Ir—Cs	1,79	Re—Ba	2,42
Ir—Ba	2,4	Re—Th	2,58—3,15
Mo—Cs	1,54—1,66	Rh—Ba	2,1—2,2
Mo—K	1,76	Ru—Ba	2,22
Mo—Ba	2,2	Ta—Cs	1,6—1,69
Mo—Na	2,64	Ta—Ba	2,2
Nb—Cs	1,37	Ta—Th	2,52
Nb—Ba	2,2	Ta—Y	3,02
Ni—Cs	1,37	W—Cs	1,62—1,78
Ni—Ba	1,52	W—Ba, O	1,96
Os—Cs	1,44—1,5	W—K	2,0
Os—Ba	2,22	W—Ba	2,1
Pd—Cs	1,51	W—Y	3,0
Pt—Rb	1,57	W—Th	3,0—3,3
Pt—Cs	1,59	W—αU	3,37
Pt—K	1,69	W—βU	3,31
Pt—Ba	2,05	W—γU	3,19
Pt—Na	2,10		

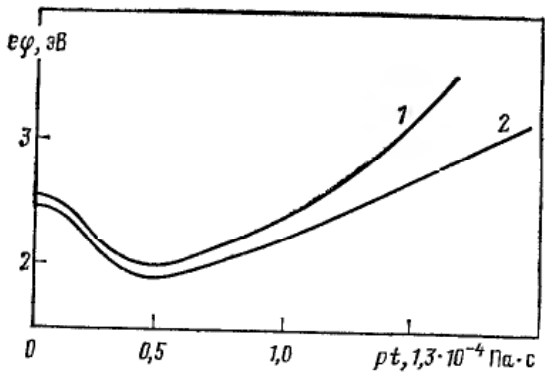


Рис. 25.1. Изменение работы выхода моноатомного слоя бария на поверхностях (100) вольфрама *(1)* и иридия *(2)* в процессе окисления. По оси абсцисс отложена экспозиция поверхности в кислороде [5]

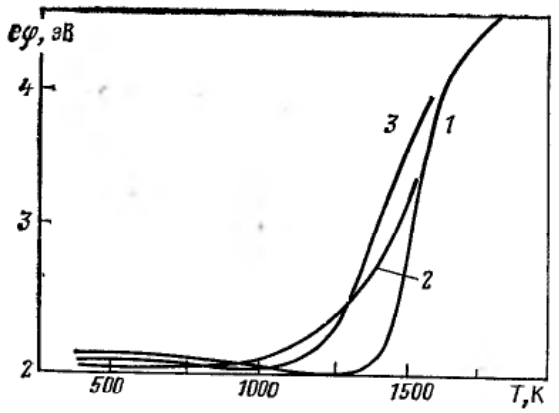


Рис. 25.2. Изменение работы выхода поверхностей (100 вольфрама *(1)*, (100) иридия *(2)* и сплава осмий — ири дий *(3)*, покрытых пленкой оксида бария толщиной (0,8 монослоя, при нагревании [5]

Таблица 25.3. **Работа выхода некоторых монокристаллических полупроводников [2] (в скобках для работы выхода указаны погрешности)**

Полупроводник	Индекс грани	$e\varphi$, эВ	Примечания
$AgAsS_2$	(100)	5,7	Сколотая грань
AlSb	(110)	4,86	*p*-Тип, сколотая грань
Bi_2Te_3	(0001)	5,40	
GaAs	(100)	4,38 (0,05)	*p*-Тип
	(110)	4,05—4,45	*n*-Тип
	(110)	4,65—5,35	*p*-Тип
	(111)	5,13	*n*-Тип
GaSb	(100)	4,0	*p*-Тип
	(110)	4,55	*p*-Тип
	(110)	4,01 (0,02)	*n*-Тип
InAs	(110)	4,9 (0,05)	Сколотая грань
InSb	(110)	4,57—4,77	
	(111)	4,39—4,43	
PbS	(100)	3,5 (0,2)	Сколотая грань
PbSe	(001)	4,14—4,30	*n*-и *p*-Типы
PbTe	(100)	5,14 (0,2)	*n*-и *p*-Типы
V_2O_5	(010)	4,5 (0,2)	
	(010)	6,71 (0,08)	

Таблица 25.4 **Работа выхода тугоплавких соединений переходных металлов с неметаллами [4]**

Металл	$e\varphi$, эВ	$e\varphi$, эВ, для соединений							
		бориды		карбиды		нитриды		силициды	
Ванадий	4,12	VB_2	3,88	VC	3,85	VN	3,56		—
Вольфрам	4,54	WB_2	2,62	W_2C	2,6—4,58		—	WSi_2	4,04—4,62
Гафний	3,53	HfB_2	3,85	HfC	2,04—4,15	HfN	3,85—3,90		—
Железо	4,31	FeB_2	3,5—3,75		—		—		—
Иттрий	3,3	YB_6	2,22—3,58		—		—	YSi_2	3,26
Лантан	3,3	LaB_6	2,41—3,20		—		—		—
Марганец	3,83	MnB_2	4,14		—		—		—
Молибден	4,3	MoB_2	3,83—4,14	Mo_2C	3,80—4,74		—	$MoSi_2$	4,02—4,73
Ниобий	3,99	NbB_2	3,65	NbC	2,24—4,1	NbN	3,92	$NbSi_2$	4,34
Рений	5,0		—		—		—	$ReSi_2$	4,02
Скандий	3,3	ScB_2	2,29—3,76		—		—		—
Тантал	4,2	TaB_2	2,8—4,4	TaC	3,05—4,4	TaN	3,8—4,42	$TaSi_2$	4,42—4,71
Титан	3,95	TiB_2	3,80—3,95	TiC	2,35—4,12	TiN	2,92—3,75	$TiSi_2$	3,95
Хром	4,58	CrB_2	3,36		—		—	$CrSi_2$	3,78
Цирконий	3,9	ZrB_2	3,60—4,48	ZrC	2,1—4,39	ZrN	2,92—3,90	$ZrSi_2$	3,95

25.3. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Плотность тока насыщения термоэлектронной эмиссии (ТЭ) для эмиттера с однородной поверхностью при слабом внешнем электрическом поле, не влияющем на работу выхода, определяется уравнением Ричардсона — Дэшмана [2]:

$$j_э = (1 - \bar{r})\, A_0\, T^2 \exp(-e\varphi_T / kT),$$

где $\bar{r}$ — коэффициент отражения электронов от потенциального барьера, усредненный по энергиям электронов; $A_0 = 4\pi mek^2/h^3 = 120{,}4$ А·см$^{-2}$·К$^{-2}$ — универсальная постоянная, одинаковая для всех твердых тел; $\varphi_T = \varphi_0 + (d\varphi/dT)T$; φ_0 — значение φ, В, при $T = 0$; $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ Кл — заряд электрона: $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$ — постоянная Больцмана (рис. 25.3).

Термоэмиссионный катод (термокатод) — элемент электровакуумного или газонаполненного прибора, являющийся источником электронов. Основные типы термоэмиссионных катодов: металлические, оксидные, металлопористые (распределительные), металлосплавные и боридные.

Металлические термокатоды, изготавливаемые из торированного вольфрама, в настоящее время находят ограниченное применение.

Оксидный термокатод — смесь оксидов металлов, наиесенная на металлический керн. В низкотемпературных катодах, работающих в интервале температур от 900 до 1300 К, используются смеси оксидов щелочноземельных металлов — бария, кальция и стронция. Эти оксиды получаются при разложении карбонатов щелочноземельных металлов, нанесенных на металлический керн катода, в процессе его прогрева непосредственно в вакуумном приборе, в котором катод должен работать. Оксидные низкотемпературные катоды наиболее широко применяются в электровакуумных приборах. В высокотемпературных оксидных катодах с рабочей температурой 1400—1900 К используются оксиды иттрия и тория. Такие катоды применяются в магнетронах.

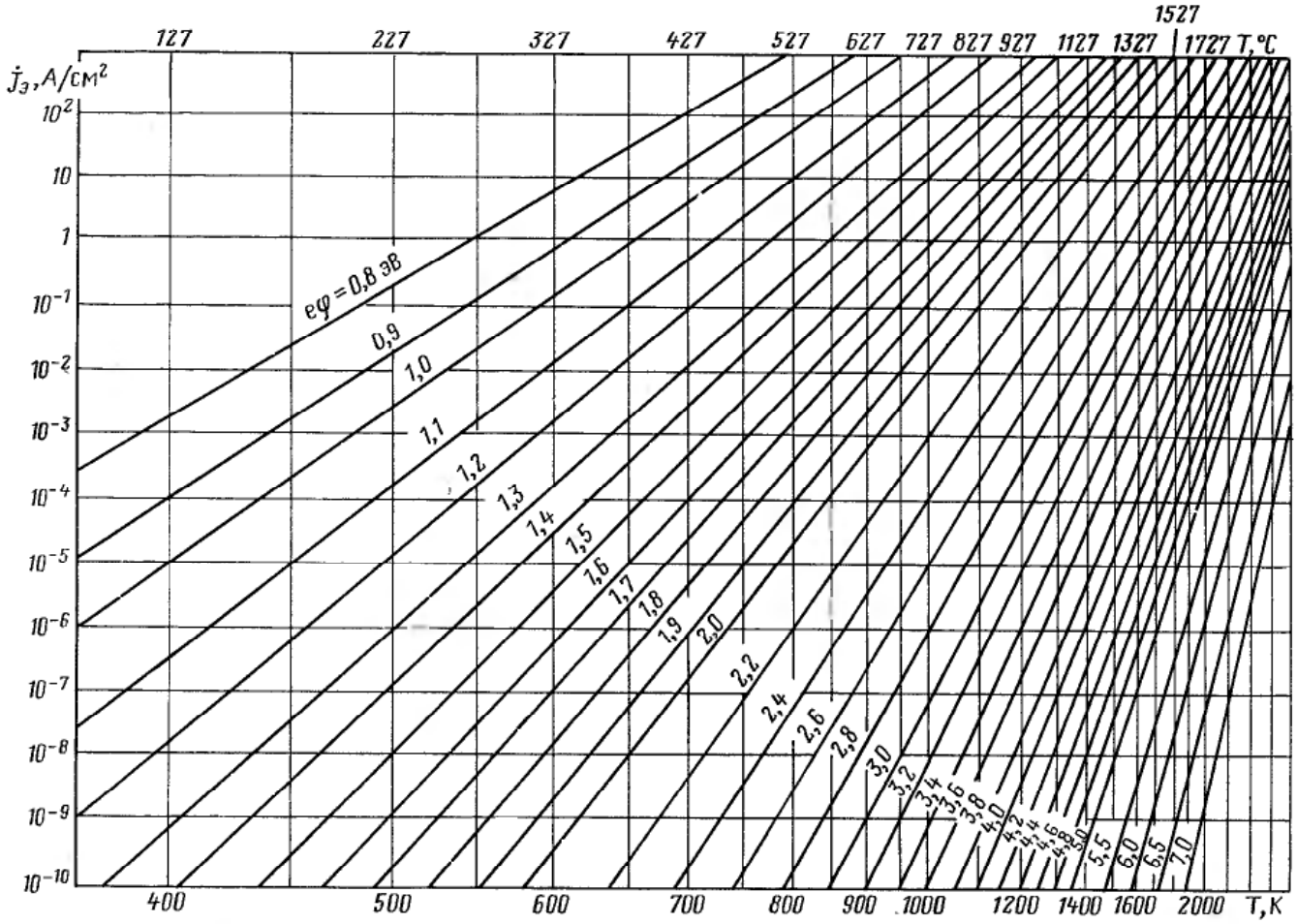


Рис. 25.3. Зависимости плотности тока ТЭ от температуры и работы выхода катода [6]

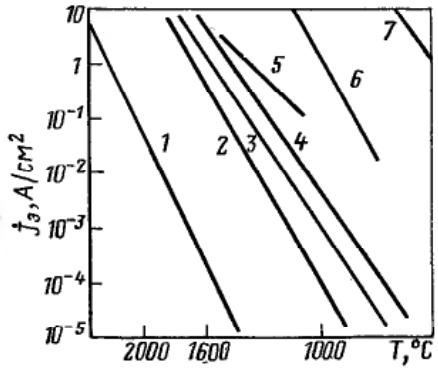


Рис. 25.4. Зависимость плотности тока ТЭ от температуры для различных катодов [7]:

1 — вольфрам; *2* — торированный вольфрам; *3* — оксид тория; *4* — гексаборид лантана (см. также [8]); *5* — оксидно-иттриевый катод с присадками вольфрама, молибдена или тантала [11]; *6* — *L*-катод; *7* — оксидный катод

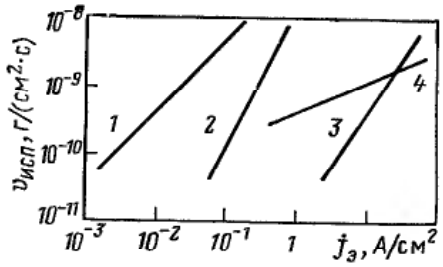


Рис. 25.5. Зависимость скорости испарения от плотности тока ТЭ для различных материалов [7]:
1 — вольфрам; *2* — торированный вольфрам; *3* — пропитанный катод; *4* — гексаборид лантана [7, 8]

Металлопористый вольфрамово-бариевый термокатод — пористая вольфрамовая губка, внешняя поверхность которой покрыта пленкой бария, снижающей работу выхода и обеспечивающей получение большого тока ТЭ. В процессе работы пленка бария разрушается вследствие ионной бомбардировки и под воздействием газов, выделяющихся из деталей приборов. Возобновление пленки происходит вследствие поступления бария из вольфрамовой губки при термическом разложении содержащегося в ней активного вещества. Существует несколько типов металлопористых термокатодов: камерные, или *L*-катоды — состоят из камеры, заполненной активным веществом — карбонатом бария-стронция — и закрытой стенкой-губкой, наружная сторона которой является эмиттирующей поверхностью; пропитанные — пористая губка из вольфрама, рения или молибдена, поры которой заполнены активным веществом — алюминатом или вольфраматом бария-кальция; и прессованные. Последние изготовляются в виде таблеток или керамических трубок, путем спрессовывания смеси из порошков оксида иттрия или оксида тория и порошков тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, тантал). Катоды этого типа так же, как и оксидно-ториевый, работают при температурах 1700—1800° С и предназначены для использования в СВЧ-приборах, главным образом в магнетронах.

Боридный термокатод — катод на основе металлоподобных соединений типа MeB_6, где Me — щелочноземельный, редкоземельный металлы или торий. В качестве термокатода наиболее широко применяется гексаборид лантана, реже — гексабориды иттрия и гадолиния и диборид хрома. Покрытие оксидного слоя тонкой пленкой осмия понижает работу выхода катода и увеличивает его эмиссионную способность. Термоэмиссионные катоды из гексаборида лантана работают при температуре 1650 К и обеспечивают получение плотности тока ТЭ до 50 А/см^2. Высокая механическая прочность и устойчивость таких катодов к ионной бомбардировке позволяет использовать их в режиме термополевой эмиссии (при напряженности внешнего электрического поля 10^6 В/см значительная часть эмиссионного тока обусловлена туннелированием электронов сквозь барьер). В этом режиме катод из гексаборида лантана при температуре 1400—1500 К может эмитировать ток с плотностью до 1000 А/см^2. Катоды из гексаборида лантана не отравляются на воздухе и устойчиво работают в относительно плохом вакууме. Срок их службы не зависит от давления остаточных газов в приборе до давлений порядка 10^{-2} Па. Эти катоды используются в ускорителях и различных вакуумных устройствах.

Основные характеристики термокатодов — работа выхода $e\varphi$; рабочая температура T; плотность тока насыщения ТЭ $j_э$ и ее зависимость от температуры; скорость испарения активного вещества при рабочей температуре $v_{исп}$; эффективность катода η — отношение плотности тока ТЭ к мощности, затрачиваемой на нагревание катода; критерий качества катода q — отношение работы выхода к теплоте испарения активного вещества при данной температуре; толщина активного слоя d (для однородных катодов — диаметр). Характеристики различных термокатодов приведены в табл. 25.5—25.14 и на рис. 25.4—25.11.

Таблица 25.5 **Термоэмиссионные свойства вольфрамового термокатода [6] (чистый вольфрам, $\rho = 19{,}3$ г/см^3, $e\varphi = 4{,}54$ эВ)**

T, К	$j_э$, А/см^2	$v_{исп}$, г/(см^2·с)	$j_э/v_{исп}$, Кл/г	$d_{1\,ч}$, мм/ч*	Срок службы, ч		
					$d = 0.1$ мм	$d = 1$ мм	массивный катод
2100	$3{,}9\cdot10^{-3}$	$1{,}6\cdot10^{-12}$	$2{,}5\cdot10^{9}$	$3{,}0\cdot10^{-9}$	$1\cdot10^{6}$	$1\cdot10^{7}$	$1\cdot10^{8}$
2200	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$1{,}2\cdot10^{-11}$	$1{,}1\cdot10^{9}$	$2{,}3\cdot10^{-8}$	$1{,}4\cdot10^{5}$	$1{,}4\cdot10^{6}$	$1{,}4\cdot10^{7}$
2300	$4{,}1\cdot10^{-2}$	$7{,}8\cdot10^{-11}$	$5{,}0\cdot10^{8}$	$1{,}5\cdot10^{-7}$	$2\cdot10^{4}$	$2\cdot10^{5}$	$2{,}2\cdot10^{6}$
2400	$1{,}2\cdot10^{-1}$	$4{,}4\cdot10^{-10}$	$2{,}7\cdot10^{8}$	$8{,}2\cdot10^{-7}$	$3\cdot10^{3}$	$3\cdot10^{4}$	$3\cdot10^{5}$
2500	$3{,}0\cdot10^{-1}$	$2{,}0\cdot10^{-9}$	$1{,}5\cdot10^{8}$	$3{,}7\cdot10^{-6}$	830	8300	$8\cdot10^{4}$
2600	$7{,}0\cdot10^{-1}$	$8{,}8\cdot10^{-9}$	$8{,}0\cdot10^{7}$	$1{,}6\cdot10^{-5}$	180	1800	$1{,}8\cdot10^{4}$
2700	1,6	$3{,}2\cdot10^{-8}$	$5{,}0\cdot10^{7}$	$6{,}0\cdot10^{-5}$	50	500	$5\cdot10^{3}$
2800	3,5	$1{,}1\cdot10^{-7}$	$3{,}1\cdot10^{7}$	$2{,}1\cdot10^{-4}$	14	140	1440
2900	7,3	$3{,}5\cdot10^{-7}$	$2{,}1\cdot10^{7}$	$6{,}5\cdot10^{-4}$	4,6	46	460
3000	14.0	$9{,}7\cdot10^{7}$	$1{,}7\cdot10^{7}$	$1{,}8\cdot10^{-3}$	1,7	17	170

* Толщина слоя вещества, испаряющегося за 1 час при температуре T.

Рис. 25.8. Термоэлектронная эмиссия пяти тугоплавких металлов и сплава вольфрам — молибден (в равных массовых количествах) в парах цезия [9]:

температура жидкой фазы цезия 200°С. Наклонные прямые — линии постоянной работы выхода

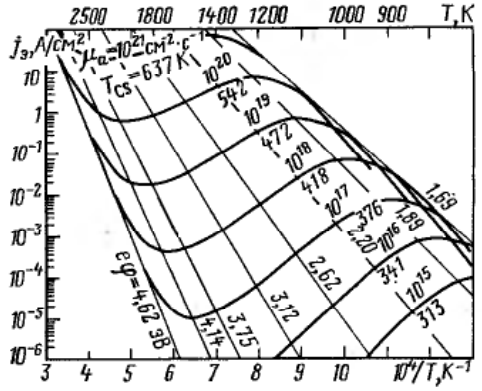


Рис. 25.6. Термоэлектронная эмиссия поликристаллического вольфрама в парах цезия [9]:

для каждой кривой снизу указана температура жидкой фазы цезия T_{Cs} и сверху плотность потока атомов цезия на поверхность катода μ_α Наклонные прямые — линии постоянной работы выхода

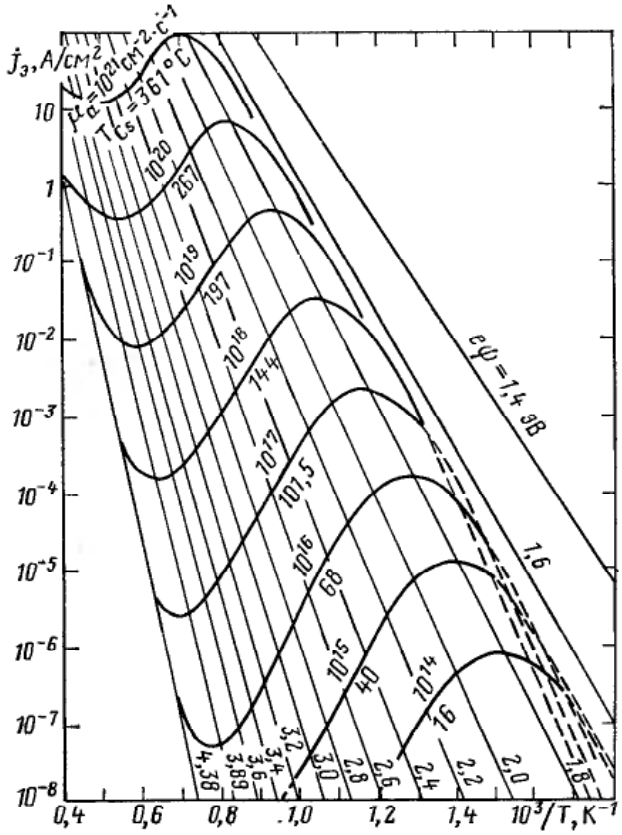


Рис. 25.7. Термоэлектроннаая эмиссия поликристаллического молибдена в парах цезия [9]. Обозначения те же, что на рис. 25.6.

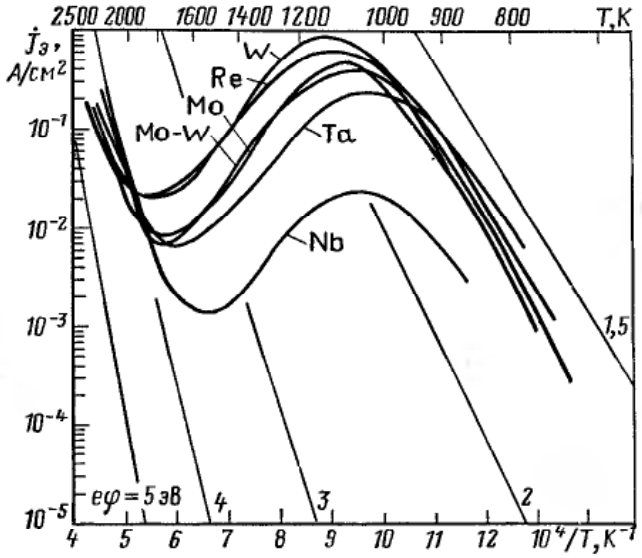


Таблица 25.6. **Термоэмиссионные свойства металлопористого вольфрамово-бариевого термокатода (*L*-катод) [6] ($e\varphi = 1{,}8 \div 2{,}0$ эВ, количество BaO 30 мг/см²)**

T, К	$j_э$, А/см²	$v_{исп}$, г/(см²·с)	$j_э/v_{исп}$, Кл/г	$d_{1\text{ ч}}$, мм/ч	Срок службы*, ч
800	$1 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—
900	$3 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—
1000	$5 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—
1100	$6 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—
1200	0,4	—	—	—	—
1300	2	$1{,}7 \cdot 10^{-10}$	$1{,}2 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^4$
1400	10	$2 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^{-3}$	4300
1500	30	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$	$1{,}8 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^{-2}$	500
1600	90	$1 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^8$	0,4	75
1700	300	$5{,}5 \cdot 10^{-7}$	$5{,}5 \cdot 10^8$	2	15

* Срок службы определяется запасом активного вещества; данные приведены для стандартного катода [6].

Таблица 25 7. **Термоэмиссионные свойства BaO-SrO-оксидного термокатода [6]**

[$\bar{\rho} = 5{,}5$ г/см³, $e\varphi = 1{,}6$ эВ, толщина активного слоя 20 мкм (10 мг/см²), керн никелевый, $d_{кр}^{*1} = 6$ мкм]

T, К	$j_э$, А/см²	$v_{исп}^{*2}$, г/(см²·с)	$j_э/v_{исп}^{*2}$, Кл/г	d_{14}^{*2}, мм/ч	Срок службы, ч
500	10^{-5}	—	—	—	—
600	$4 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—
700	$7 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—
800	$4 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—
900	0,4	—	—	—	—
1000	3,0	$5 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{10}$	$3{,}2 \cdot 10^{-7}$	5000
1100	12	$2 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^9$	$1{,}3 \cdot 10^{-5}$	115
1200	50	$8 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^8$	$5{,}2 \cdot 10^{-4}$	3
1300	200	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^8$	$6{,}5 \cdot 10^{-3}$	0,23

*1 Минимальная толщина активного слоя, при которой термокатод сохраняет работоспособность.

*2 Значения для BaO. Для BaO — SrO-термокатодов скорость испарения несколько меньше.

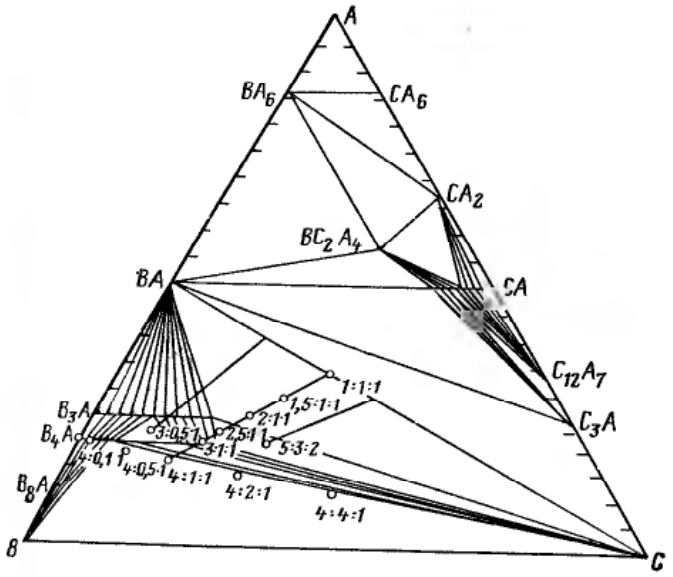


Рис. 25.9. Фазовая диаграмма оксидного катода (система BaO—CaO—Al_2O_3) [10], определенная при $T=1250$°C: $B \equiv BaO$; $C \equiv CaO$; $A \equiv Al_2O_3$. Существенные композиции отмечены кружками, а их мольные отношения даны как B : C : A

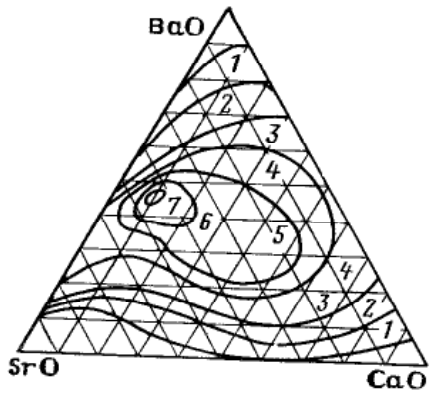


Рис. 25.10. Эмиссионная способность оксидов разного состава [12]:
цифры у кривых — значения импульсного тока, А/см²

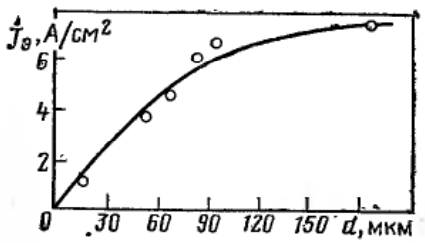


Рис. 25.11. Зависимость плотности стабильного тока ТЭ эмиссии BaO—SrO-оксидного катода от толщины слоя оксида d [13]

Таблица 25.8. Рекомендуемые режимы работы оксидных катодов [2]

$j_э$, А/см²	T, К	Предельный срок службы, ч
Непрерывный режим токоотбора		
0,05	1000—1040	20 000
0,15	1000—1070	5 000
0,20	1070—1100	3 000
0,30	1070—1100	2 000
Импульсный режим токоотбора		
3,0	1000—1040	10 000
5,0	1000—1040	5 000
6,0*1	1070—1100	3 000
10,0*1	1070—1100	2 000
2,5*2	1070—1100	3 000
4,0*2	1070—1100	2 000

*1 Длительность импульса — микросекунды.

*2 Длительность импульса — сотни микросекунд.

Таблица 25.9. Термоэмиссионные характеристики и срок службы прессованных металлопористых оксидно-никелевых катодов [7]

T, К	$j_э$, А/см²	Срок службы, ч	Режим отбора тока
1200	0,5	5000	Стационарный
1220	0,5	5000	»
1270	1	5000	»
1340	3	3000	»

Таблица 25.10. Термоэмиссионные константы боридов, позволяющие рассчитать φ_T по формуле $\varphi_T = \varphi_0 + (\partial\varphi/\partial T)\,T$ и коэффициент вторичной эмиссии [7]

Соединение	$e\varphi_0$, эВ	$e\partial\varphi/\partial T$, 10^{-4} эВ/К	Коэффициент вторичной эмиссии σ
BaB_6	3,45	7,5	—
CeB_6	2,59	2,3	0,68
CrB_2	3,36	—	0,77
DyB_6	3,53	1,5	0,8
ErB_6	3,37	2,3	—

Продолжение табл. 25.10

Соединение	$e\varphi_0$, эВ	$ed\varphi/dT$, 10^{-4} эВ/К	Коэффициент вторичной эмиссии σ
EuB_6	4,9	—	—
GdB_6	2,05	4,0	0,8
HoB_6	3,42	1,6	0,7
LaB_6	2,68	1,4	0,95
LuB_6	3,0	1,6	0,8
MnB_2	4,14	—	—
NdB_6	3,97	1,6	0,8
PrB_6	3,46	2,5	0,8
ScB_6	2,96	2,3	0,58
SrB_6	2,67	2,5	—
TbB_6	3,26	—	—
ThB_6	2,92	2,0	—
TiB_2	3,88	—	0,82
$T_mB_6+T_mB_4$	3,38	—	—
VB_2	3,95	—	0,8
YB_6	2,22	2,18	1,0
YbB_6	3,13	3,0	—
ZrB_2	3,67	2,0	0,85

Таблица 25.11. **Термоэмиссионные свойства гексаборида лантана LaB_6 [6, 8] ($\rho = 2{,}61$ г/см^3, $e\varphi = 2{,}68$ эВ)**

T, К	$j_э$, А/см^2	$v_{исп}$, г/(см^2·с)	$j_э / v_{исп}$, Кл/г	d, мм	Срок службы катода с косвенным подогревом, ч: Точечный монокристаллический, $d_{кр} \approx 3$ мкм	Массивный, $d_{кр} \approx 100$ мкм
1600	0,4	$1\cdot10^{-11}$	$4{,}0\cdot10^{10}$	$1{,}4\cdot10^{-7}$	$2\cdot10^4$	$7\cdot10^5$
1700	1,0	$1\cdot10^{-10}$	$1{,}0\cdot10^{10}$	$1{,}4\cdot10^{-6}$	2150	$7\cdot10^4$
1800	3,0	$1\cdot10^{-9}$	$3{,}0\cdot10^9$	$1{,}4\cdot10^{-5}$	215	$7\cdot10^3$
1900	8,5	$9\cdot10^{-9}$	$9{,}5\cdot10^8$	$1{,}2\cdot10^{-4}$	25	800
2000	25	$7\cdot10^{-8}$	$3{,}6\cdot10^8$	$1{,}0\cdot10^{-3}$	3	100
2100	100	$6\cdot10^{-7}$	$1{,}7\cdot10^8$	$8{,}3\cdot10^{-3}$	0,35	12
2200	400	$4\cdot10^{-6}$	$1{,}0\cdot10^8$	$5{,}55\cdot10^{-2}$	0,05	1,8

Таблица 25.12. **Термоэмиссионные свойства прессованных термокатодов различного состава [7]**

Катод (массовый состав, %)	T, °С	$j_э$, А/см^2: Импульсный режим	Стационарный режим
$ThH_2 + W_2C + W$ (0,5 + 10 + 89,5)	1700	—	—
$W + ThO_2$ (96 + 4)	1500	0,8	—
	1600	2,0	—
$W + ThO_2 + B$ (95 + 4 + 1)	1370	—	0,4

Продолжение табл. 25.12

Катод (массовый состав, %)	T, °С	$j_э$, А/см^2: Импульсный режим	Стационарный режим
$W + ThO_2 + B$ (97,5 + 2 + 0,5)	1370	—	0,4
$W + La_2O_3$ (70 + 30)	1300	—	1,4
$W + Nd_2O_3$ (70 + 30)	1300	—	0,5
$W + Gd_2O_3$ (70 + 30)	1400	—	0,4
$W +$ [75% Gd_2O_3 + 25% La_2O_3] (70 + 30)	1400	—	0,86
W + Th (пропитанный)	1600	—	2—3

Таблица 25.13. **Высокотемпературные термокатоды [14]**

Катод	T, °С	$j_э$, А/см^2	Срок службы, ч
$Mo — La_2O_3$	1580	7	7000
$Mo — C — La_2O_3 — Pt$	1570	5	—
Ir — La	1430	4	4500
$Re — LaB_6$	1400	3	1500
W — Re — Y	1440	1	800
W — Re — Nd	1730	2	500
ZrC — W	1780	1	10 000
ZrC — W, ZrC — Mo	2030	1	9000

Таблица 25.14. **Работа выхода $e\varphi$, теплота испарения Q и критерий качества $q = e\varphi/Q$ термокатодов [7]**

Тип катода	$e\varphi$, эВ	Q, эВ	$e\varphi/Q$	T, К, при долговечности: 10 000 ч	1000 ч
Вольфрамовый	4,54	8,0	0,57	2300*	2500*
Танталовый	4,2	7,9	0,53	2000*	2200*
Ториево-оксидный	3,2	7,6	0,42	1770	1870
Боридный	2,8	6,8	0,41	1720	1870
Вольфрамово-бариевый	2,1	4,7	0,45	1300	1420
Оксидный	1,6	4,0	0,4	1030	1100

* Значения ориентировочные, так как долговечность катодов прямого накала зависит также от диаметра катода.

25.4. ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Фотоэлектронная эмиссия (ФЭ) — эмиссия электронов, вызываемая облучением тел электромагнитным излучением [15—21].

Приведем основные законы ФЭ:

1. Фототок в режиме насыщения прямо пропорционален интенсивности падающего излучения.

2. Для каждого вещества существует длинноволновая граница λ_0. При $\lambda > \lambda_0$ ФЭ не происходит. С длинноволновой границей связана пороговая частота $\nu_0 = c/\lambda_0$ (c — скорость света) и пороговая энергия или фотоэлектрическая работа выхода $h\nu_0$.

3. Максимальная кинетическая энергия фотоэлект-

ронов линейно возрастает с частотой падающего излучения и не зависит от его интенсивности.

Эти законы нарушаются при очень больших плотностях потока падающего излучения ($F \geqslant 1$ Вт/см^2), когда становятся существенными многофотонные процессы.

Перечислим основные характеристики фотокатодов:

Квантовый выход $Y_\lambda = (I_\lambda/e)/(F_\lambda/h\nu)$, электрон/фотон — число вышедших в вакуум фотоэлектронов, приходящихся на каждый падающий на поверхность фотокатода фотон. Здесь I_λ — фототок насыщения на данной длине волны; F_λ — интенсивность излучения на данной длине волны.

Спектральная чувствительность $S_\lambda = I_\lambda/F_\lambda = 0{,}807\, Y_\lambda \lambda$, мА/Вт — фототок насыщения на единицу мощности падающего на фотокатод монохроматического излучения (λ — в нм).

Спектральная характеристика — зависимость S_λ или Y_λ от частоты или длины волны падающего излучения.

Интегральная чувствительность S — отношение фототока насыщения к потоку излучения стандартного источника света, за который обычно принимают вольфрамовую лампу накаливания с температурой нити 2850 К:

$$S = I/F = \int_0^{\lambda_0} S_\lambda\ F_\lambda\, d\lambda\ /683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda\ K_\lambda\, d\lambda.$$

Здесь S — в мкА/лм; S_λ — в мкА/Вт; K_λ — относительная спектральная чувствительность человеческого глаза ($K_{max} = K_{\lambda=555\text{нм}}$); λ_1 и λ_2 — граничные длины волн излучения видимого спектра.

Плотность темнового тока $j_т$ — плотность тока ТЭ неосвещаемого фотокатода при рабочей температуре. Темновой ток — основной источник шума в фотоэлектронных приборах. Среднее квадратическое значение шумового тока в отсутствие излучения дается формулой

$$\left(\overline{i_ш^2}\right)^{1/2} = \left(2ej_T\ s\Delta f\right)^{1/2},$$

где s — площадь поверхности фотокатода; Δf — ширина полосы частот регистрирующего устройства.

Фотоэмиссия из металлов. Пороговая энергия ФЭ из металлов совпадает с работой выхода. ФЭ из металлических фотокатодов при частотах излучения, не очень далеких от пороговой частоты ($\nu \leqslant 1{,}5\ \nu_0$), хорошо описывается феноменологической теорией Фаулера, согласно которой

$$I = \begin{cases} \alpha A_0 T^2 \exp\left(-\dfrac{h\nu_0 - h\nu}{kT}\right), & \nu < \nu_0; \\ \alpha \dfrac{A_0}{2}\left[\dfrac{(h\nu - h\nu_0)^2}{k^2} + \dfrac{\pi^2}{3} T^2\right] \nu > \nu_0, \end{cases}$$

где $\alpha \approx F/h\nu$ — отношение плотности возбужденных светом электронов к плотности нормального электронного газа в эмиттере; $A_0 = 4\pi emk^2/h^3$ — постоянная Ричардсона. Пороговая частота ФЭ ν_0 строго определена только при $T=0$. При $T>0$ ФЭ наблюдается вблизи порога и при частотах $\nu < \nu_0$. Квантовый выход ФЭ из чистых металлических поверхностей в видимой области спектра имеет порядок 10^{-4} электрон/фотон, а при $h\nu \leqslant 10$ эВ не превышает 10^{-2} электрон/фотон (рис. 25.12).

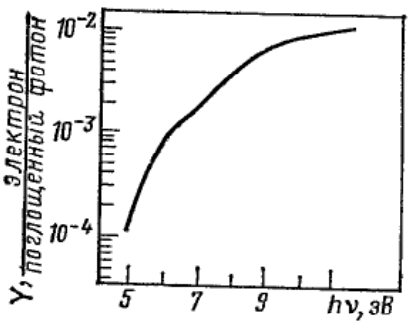


Рис. 25.12. Спектральная характеристика квантового выхода ФЭ с чистой поверхности меди [18]

Фотоэмиссия из полупроводников. В полупроводниках ФЭ может быть обусловлена возбуждением электронов из валентной зоны, с уровней примесей, дефектов, поверхностных состояний и из зоны проводимости (в вырожденных полупроводниках n-типа). Для каждого из этих случаев пороговая частота имеет свое значение. Обычно, если иное не оговорено, под фотоэлектрической работой выхода понимают минимальную энергию фотонов, при которой начинается ФЭ из валентной зоны полупроводника (табл. 25.15). Это значение, как правило, превосходит работу выхода. Спектральная зависимость квантового выхода ФЭ вблизи порога в полупроводниках имеет вид

$$Y \sim (h\nu - h\nu_0)^m,$$

где $m = 1 \div 3$ в зависимости от типа оптических переходов и механизма рассеяния фотоэлектронов. Квантовый выход ФЭ из полупроводников зависит от электронного сродства χ — энергии, необходимой для перевода электрона со дна зоны проводимости на уровень вакуума. Все эффективные фотокатоды имеют малое значение χ, так что $\chi/E_g < 1$. Квантовый выход фотоэмиссии полупроводников с $\chi/E_g > 1$ мал (рис. 25.13).

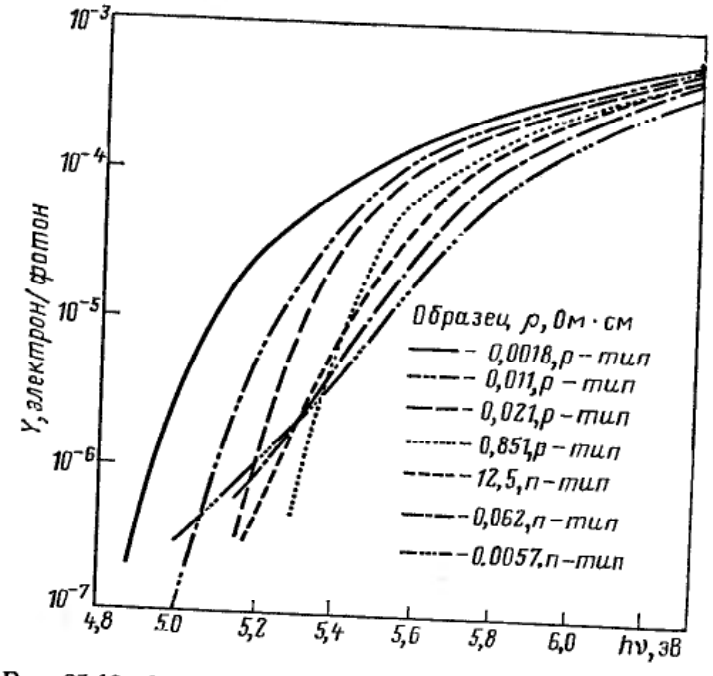


Рис. 25.13. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для образцов кремния n- и p-типов с различной степенью легирования $\chi/E_g \approx 4$ [16]

Сниженне работы выхода полупроводников путем адсорбции на их поверхности электроположительных атомов (цезия, бария и других) приводит к уменьшению χ и резкому увеличению квантового выхода. В случае GaAs, GaP, Si и ряда других полупроводников совместная адсорбция цезия и кислорода приводит к столь сильному снижению работы выхода, что реализуется условие отрицательного электронного сродства (ОЭС). Полупроводники с ОЭС обладают наибольшим квантовым выходом в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

Эффективные фотокатоды. Все эффективные фотокатоды — полупроводники. Металлы имеют высокий квантовый выход (около 0,1 электрон/фотон) только в области $h\nu > 12$ эВ и обычно при наличии на их поверхности оксидных пленок.

Эффективными фотокатодами для области спектра $\lambda < 200$ нм ($h\nu > 6$ эВ) являются щелочногалоидные соединения (CsI, CsBr и другие), иодид меди и галоидные соединения серебра. Высокий квантовый выход в области $\lambda = 200 \div 350$ нм получен на теллуриде цезия (Cs_2Te) и теллуриде рубидия (Rb_2Te). Следует отметить, что эти фотокатоды относятся к категории так называемых солнечно-слепых, т. е. фотокатодов, чувствительных в ультрафиолетовой области спектра, но не реагирующих на излучение Солнца. Рассмотренные ниже фотокатоды для видимой области спектра имеют высокий квантовый выход и в ультрафиолетовой области.

Фотокатоды, чувствительные в видимой области спектра, представляют собой антимониды щелочных металлов. Некоторые из них ($CsNa_2KSb$) чувствительны и в ближней инфракрасной области спектра, вплоть до $\lambda = 850 \div 900$ нм. До последнего времени единственным фотокатодом в области $\lambda = 900 \div 1100$ нм был Ag — O — — Cs-фотокатод. В настоящее время разработан новый класс фотокатодов — с ОЭС. Фотокатоды с ОЭС представляют собой сильнолегированные полупроводники p-типа (GaAs, Si, твердые растворы GaInAs, InGaAsP и другие), работа выхода которых сильно снижена адсорбцией цезия и кислорода, так что уровень вакуума находится ниже дна зоны проводимости в полупроводнике. Они обладают наивысшей чувствительностью в красной и инфракрасной областях спектра.

В области $\lambda > 1{,}1$ мкм высоким квантовым выходом обладают только фотокатоды на основе полупроводниковых гетероструктур с внешним смещением (InGaAs — InP — Ag — CsO). Длинноволновая граница таких фотокатодов определяется шириной запрещенной зоны узкозонного полупроводника (InGaAs), в котором происходит поглощение света. Сильное электрическое поле переводит фотоэлектроны из InGaAs в верхний слой InP и увеличивает их энергию до значения, превышающего уровень вакуума. Фотокатоды такого типа обладают чувствительностью в области λ до 1,7 мкм. В табл. 25.16, 25.17 и на рис. 25.14—25.26 приведены характеристики наиболее распространенных фотокатодов.

Таблица 25. 15. **Ширина запрещенной зоны E_g, сродство к электрону χ и порог фотоэмиссии $h\nu_0$ различных полупроводниковых материалов** [16]

Материал	E_g, эВ	χ, эВ	$h\nu_0$, эВ
Антимонид:			
галлия	0,7	4,1	5,5
индия	0,2	4,6	4,8
магния	0,8	3,0	3,8
Арсенид галлия	1,4	4,1	5,5
Арсенид индия	0,4	4,9	5,3
Аурит цезия	2,6	1,4	4
Бромид серебра	2,5	3,5	6
Германий	0,7	4,2	4,9
Иодид:			
калия	6,2	1,1	7,3
лития	5,9	1,4	7,3
меди	3	3	6
натрия	5,8	1,5	7,3
рубидия	6,1	1,2	7,3
цезия	6,3	0,1	6,4
Карбид кремния:			
гексагональный	2,9	4,1	7
кубический	2,2	4,8	7

Продолжение табл. 25. 15

Материал	E_g, эВ	χ, эВ	$h\nu_0$, эВ
Кремний	1,1	4	5,1
Оксид бария	3,7	1,3	5
Оксид магния	8,7	1	10
Селен	1,8	4,2	6
Селенид кадмия	1,7	5,3	7
Сульфид кадмия	2,4	3,8—4,8	6,2—7,2
Сульфид свинца	0,4	4,2	4,6
Теллур	0.3	4,6	4,9
Теллурид:			
висмута	0,1	5,2	4,3
кадмия	1,5	4,4	5,9
свинца	0,3	4,7	5
рубидия	3,3	$<0{,}5$	3,7
цезия	3,3	$<0{,}5$	3,5
Титанат бария	2,7	2,6	5,3
Фторид лития	12	1	13
Фосфид индия	1,3	4,4	5,7
Хлорид серебра	3	3	6

Таблица 25.16. **Свойства фотокатодов на осиове антимонидов щелочных металлов [15, 16, 40, 41]**

Фотокатод	Кристаллическая структура	Y_m	λ_0, нм	S, мкА/лм	E_g, эВ	χ, эВ	Тип проводимости	j_T, А/см²
Li_3Sb	Гексагональная	—	320	—	1,0	2,9	n	—
Na_3Sb	»	0,02	330	—	1,1	2,5	n	—
K_3Sb	Кубическая	>0,07	550	12	1,4	0,9	p	—
K_3Sb	Гексагональная	0,07	460	2	1,1	1,6	n	—
Rb_3Sb	Кубическая	0,10	580	25	1,0	1,2	p	—
Cs_3Sb	»	0,15—0,25	620—700	40—80	1,6	0,45	p	10^{-16}
Na_2KSb	»	0,30	600—670	30—60	1,0	1,0	p	10^{-17}
K_2CsSb	»	0,30	650—700	50—100	1,0	1,1	p	10^{-17}
K_2CsSb (O)	»	0,35	780	130	1,0	<1,1	p	10^{-16}
$CsNa_2KSb$	»	0,30—0,40	870—940	300	1,4	≈0	p	10^{-16}
Rb_2CsSb	»	0,30	680—750	130	1,45	0,2	—	10^{-17}

Таблица 25.17. **Параметры основиых фотокатодов для видимой и ближней инфракрасной областей спектра [16, 18]**

Фотокатод	λ_0, нм	Y_m	$S_{ср}$, мкА/лм	S_m, мкА/лм	j_T, А/см²
Cs_3Sb	620—700	0,2—0,25	40—80	120	10^{-16} — 10^{-15}
K_2CsSb	650—700	0,3—0,4	55—65	200	10^{-17}
$CsNa_2KSb$	900—940	0,3—0,4	200—250	450	10^{-16}
Ag — O — Cs	1200	0,005	20—40	70	10^{-13} — 10^{-11}
GaAsP — Cs — O	680	0,5	200—300	375	$<10^{-14}$
GaAs — Cs — O	900	0,3	800—1400	2150	10^{-14} — 10^{-16}
InGaAsP — Cs — O	1100—1150	0,2	200—500	1640	10^{-11} — 10^{-13}
$In_{0,53}Ga_{0,47}As$ — — InP — Ag — — Cs — O	1700	0,08	—	—	—

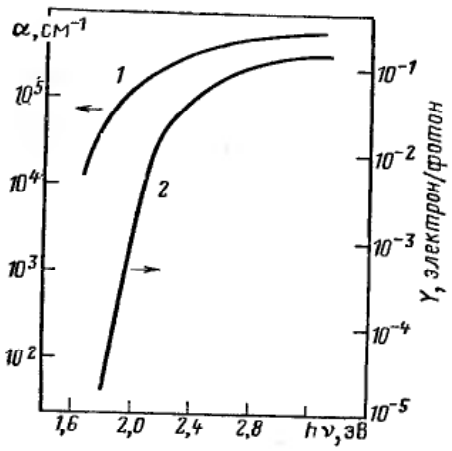


Рис. 25.14. Спектральные характеристики коэффициента поглощения α (*1*) и квантового выхода ФЭ (*2*) для фотокатода из Cs_3Sb [16]

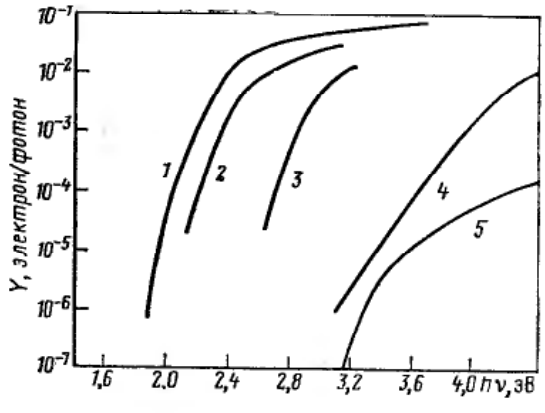


Рис. 25.15. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатодов на основе антимонидов щелочных металлов:
1 — Rb_3Sb; *2* — K_3Sb с кубической структурой; *3* — K_3Sb с гексагональной структурой; *4* — Na_3Sb; *5* — Li_3Sb [16]

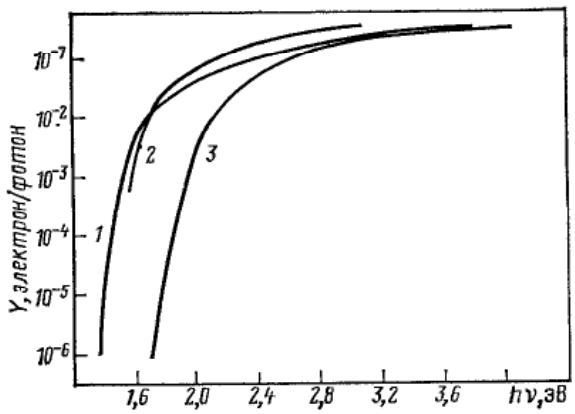


Рис. 25.16. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для многощелочного и бищелочных фотокатодов:
1 — $CsNa_2KSb$; *2* — $K_2CsSb(O)$; *3* — Na_2KSb [16]

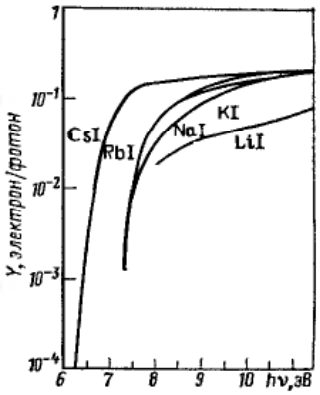


Рис. 25.19. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для иодидов щелочных металлов [16]

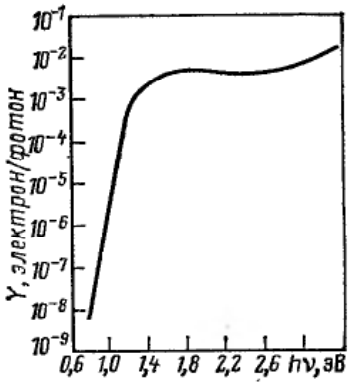


Рис. 25.17. Спектральная характеристика квантового выхода ФЭ для фотокатода из Ag—O—Cs [16]

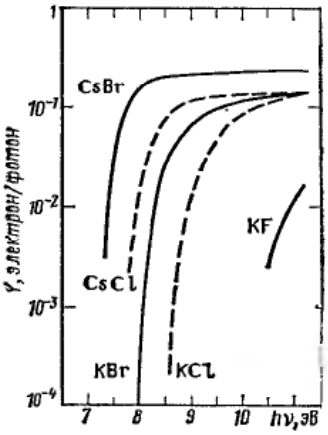


Рис. 25.20. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для некоторых щелочногалоидных соединений [16]

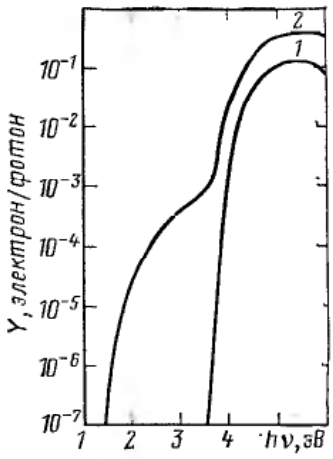


Рис. 25.18. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатода из Cs_2Te без избытка цезия (*1*) и с избытком цезия (*2*) [16]

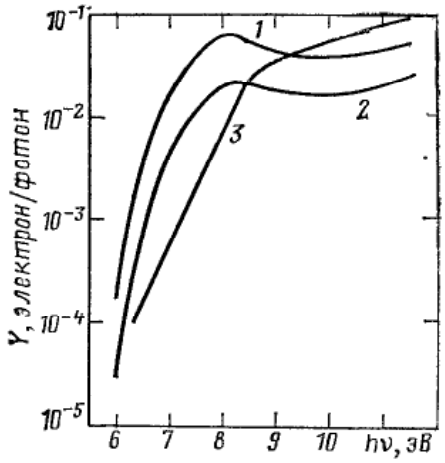


Рис. 25.21. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для некоторых галоидных соединений серебра:
1 — монокристалл AgBr; *2* — плавленый AgBr; *3* — AgCl [16]

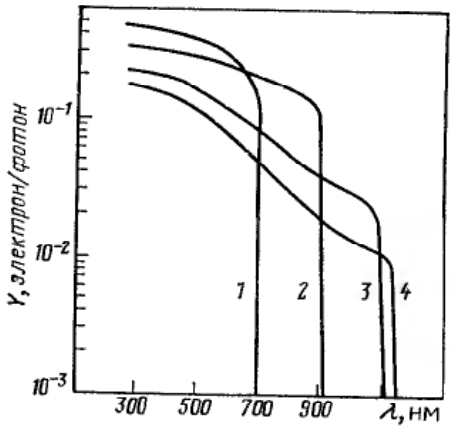


Рис. 25.22. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатодов с ОЭС:
1 — GaAsP; *2* — GaAs; *3, 4* — InGaAsP с разной шириной запрещенной зоны [18]

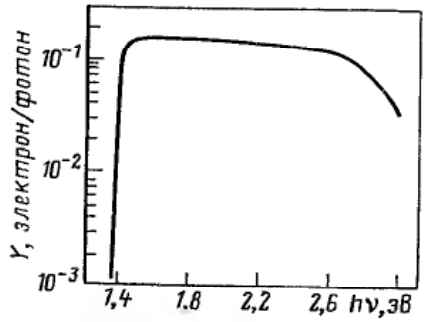


Рис. 25.23. Спектральная характеристика квантового выхода ФЭ для полупрозрачного фотокатода из GaAs [18]

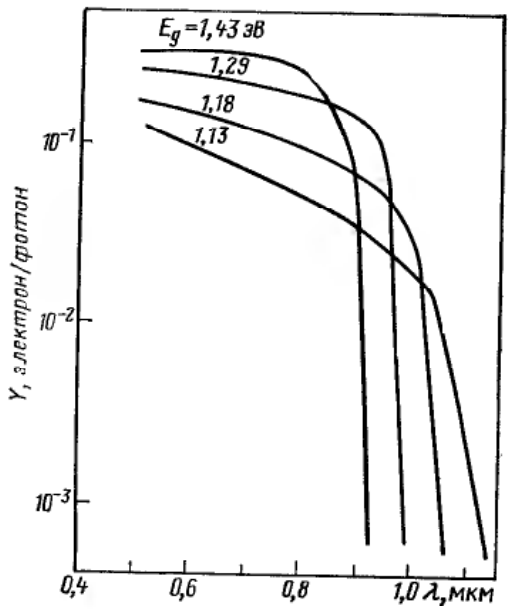


Рис. 25.24. Спектральные характеристикн квантового выхода ФЭ для фотокатодов из Ga_{1-x} In_x As с различной шириной запрещенной зоны: E_g=1,43 эВ x=0; E_g=1,29 эВ x=0,1; E_g=1,18 эВ x=0,17, E_g=1,13 эВ x=0,2 [20]

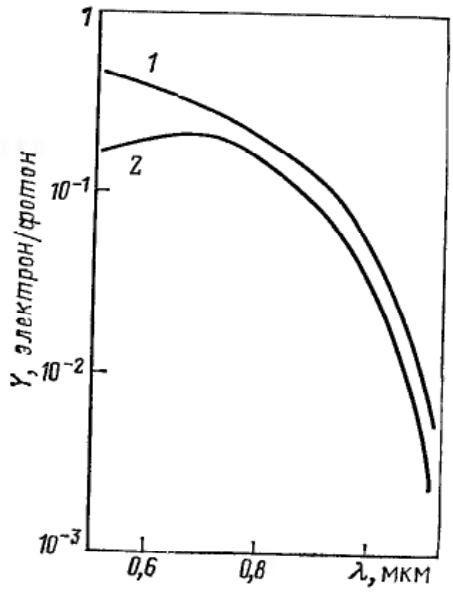


Рис. 25.25. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для кремниевого фотокатода при освещении «на отражение» (*1*) и «на просвет» (*2*) [21]

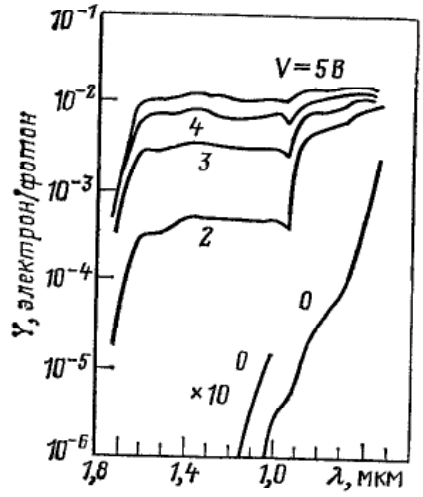


Рис. 25.26. Спектральные характеристики квантового выхода ФЭ для фотокатодов из InGaAs — InP — Ag—Cs—O, при различных значениях внешнего смещения [19]

Рентгеновская фотоэлектроиная эмиссия (РФЭ) возникает под действием рентгеновского излучения и связана с переходом фотоэлектронов с глубокнх атомных уровней в вакуум. Характерной особенностью фотоэлектронных спектров РФЭ является наличие узких линий, соответствующнх фотоэлектронам, которые вышли нз тела без рассеяния энергни (табл. 25.18 и рис. 25.28—25.30). При использовании длинноволнового рентгеновского излучения ($h\nu$=1 кэВ) энергия эмитированных электронов составляет несколько сот электрон-вольт. Длина свободного пробега таких электронов равна 0,5—2 нм (рис. 25.27), так что линейчатая часть спектров РФЭ отражает свойства приповерхностного слоя толщиной до пяти монослоев. Эта особенность спектров РФЭ позволяет использовать их для анализа состава поверхиости в рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФС). Энергии для химических элементов в соединеннях различаются на несколько электронвольт. Так, для углерода энергия фотоэлектронной 1 *s*-линии меняется от 281 (HfC, TiC) до 292 эВ (CO_2). Этот эффект, обычно называемый химическим сдвигом, дает возможность получать с помощью РФС информацию не только о составе поверхности, но и о химических

Таблица 25.18. **Энергия осиовных фотоэлектронных рентгеновских лнний (энергия связи) химических элементов ($h\nu = 1486{,}6$ эВ) и относнтельное сеченне фотоионизации для этих лнний. Сечение фотоионизацни 1 *s*-линии натрия принято за единицу [37, 39]**

Элемент	Средняя энергия линии, эВ	Диапазон энергии линии, эВ	Относительное сечение фотоионизации
	1s-переход		
$_{3}$Li	56	—	0,009
$_{4}$Be	113	4	0,033
$_{5}$B	191	8	—
$_{6}$C	287	12	0,127
$_{7}$N	402	9	0,188
$_{8}$O	531	4	0,338
$_{9}$F	686	6	0,480
$_{10}$Ne	863	0	—
$_{11}$Na	1072	2	1,000
$_{12}$Mg	1305	2	—
	$2p_{1/2}$-переход		
$_{13}$Al	74	4	0,086
	$2p_{3/2}$-переход		
$_{14}$Si	102	6	—
$_{15}$P	133	8	0,141
$_{16}$S	165	8	0,163
$_{17}$Cl	199	11	0,198
$_{18}$Ar	241	0	—
$_{19}$K	293	1	0,424
$_{20}$Ca	347	2	0,377
$_{21}$Sc	402	6	—
$_{22}$Ti	458	8	—
$_{23}$V	515	6	0,421
$_{24}$Cr	577	6	0,522
$_{25}$Mn	641	4	0,478
$_{26}$Fe	710	8	0,865
$_{27}$Co	781	6	0,777
$_{28}$Ni	855	6	0,836
$_{29}$Cu	934	4	1,500
$_{30}$Zn	1022	2	0,135
$_{31}$Ga	1117	2	0,200
$_{32}$Ge	1219	4	0,210
$_{33}$As	1329	7	0,180
	$3d_{5/2}$-переход		
$_{34}$Se	57	8	0,239
$_{35}$Br	69	7	0,262
$_{36}$Kr	88	0	—
$_{37}$Rb	110	1	0,284
$_{38}$Sr	133	—	0,380
$_{39}$Y	158	—	0,430

Продолжение табл. 25.18

Элемент	Средняя энергия линии, эВ	Диапазон энергии линии, эВ	Относительное сечение фотоионизации
$_{40}$Zr	181	6	0,570
$_{41}$Nb	206	8	0,564
$_{42}$Mo	230	6	—
$_{43}$Tc	253	—	—
$_{44}$Ru	282	4	0,846
$_{45}$Rh	309	4	0,990
$_{46}$Pd	337	5	0,894
$_{47}$Ag	368	2	1,170
$_{48}$Cd	405	2	1,410
$_{49}$In	445	3	1,880
$_{50}$Sn	486	3	2,35
$_{51}$Sb	530	4	2,81
$_{52}$Tb	575	5	1,89
$_{53}$I	619	6	1,88
$_{54}$Xe	672	4	—
$_{55}$Cs	724	2	3,12
$_{56}$Ba	780	2	2,70
$_{57}$La	834	—	1,00
$_{58}$Ce	882	—	1,00
$_{59}$Pr	930	—	1,00
$_{60}$Nd	980	—	1,51
$_{61}$Pm	1034	—	—
$_{62}$Sm	1083	—	1,21
$_{63}$Eu	1136	—	1,24
$_{64}$Gd	1186	—	1,91
$_{65}$Tb	1244	—	—
$_{66}$Dy	1295	—	—
	$4d_{5/2}$-переход		
$_{67}$Ho	161	—	0,119
$_{68}$Er	169	—	0,237
$_{69}$Tm	180	—	0,189
$_{70}$Yb	185	—	0,282
$_{71}$Lu	197	—	0,236
	$4f_{7/2}$-переход		
$_{72}$Hf	17	6	0,427
$_{73}$Ta	25	8	0,660
$_{74}$W	34	6	—
$_{75}$Re	43	6	0,885
$_{76}$Os	52	3	0,625
$_{77}$Ir	62	4	0,860
$_{78}$Pt	73	5	0,86
$_{79}$Au	85	3	1,04
$_{80}$Hg	100	2	1,14
$_{81}$Tl	118	2	1,17
$_{82}$Pb	138	3	1,507
$_{83}$Bi	159	4	1,67
$_{90}$Th	335	3	3,30
$_{92}$V	380	5	3,34

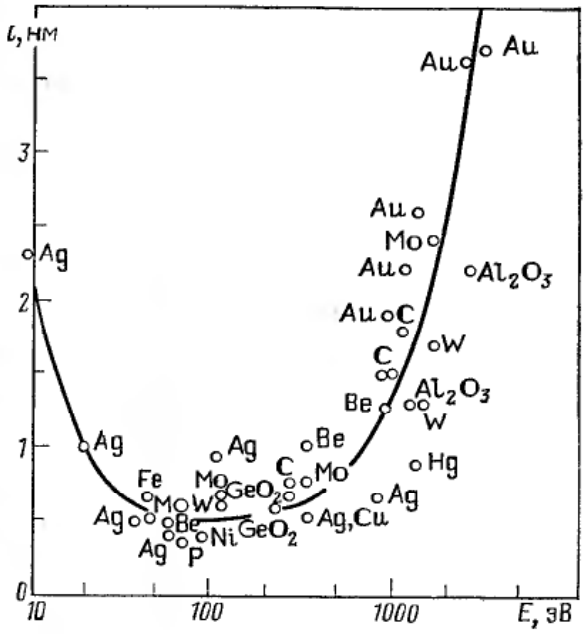


Рис. 25.27. Зависимость средней глубины выхода l электронов из твердых тел от энергии электронов [23]

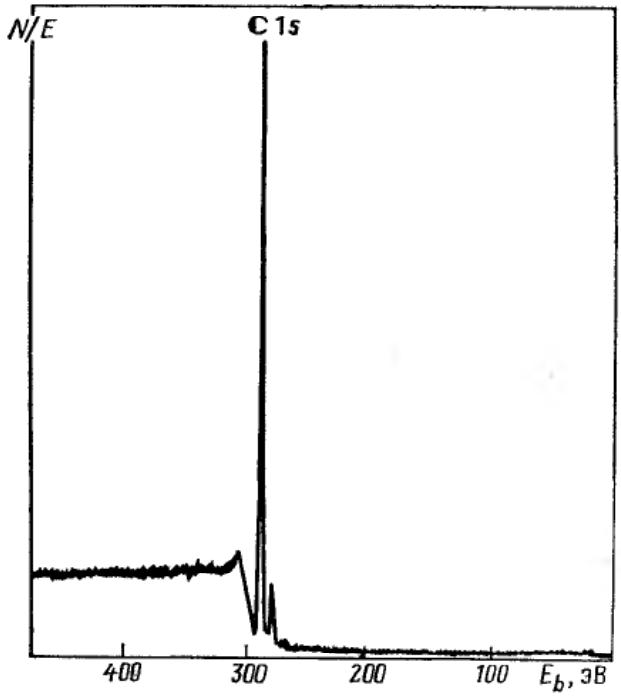


Рис. 25.28. Фотоэлектронный рентгеновский спектр углерода (мишень — полиэтилен) [39]:
по оси абсцисс отложена энергия связи электрона в атоме

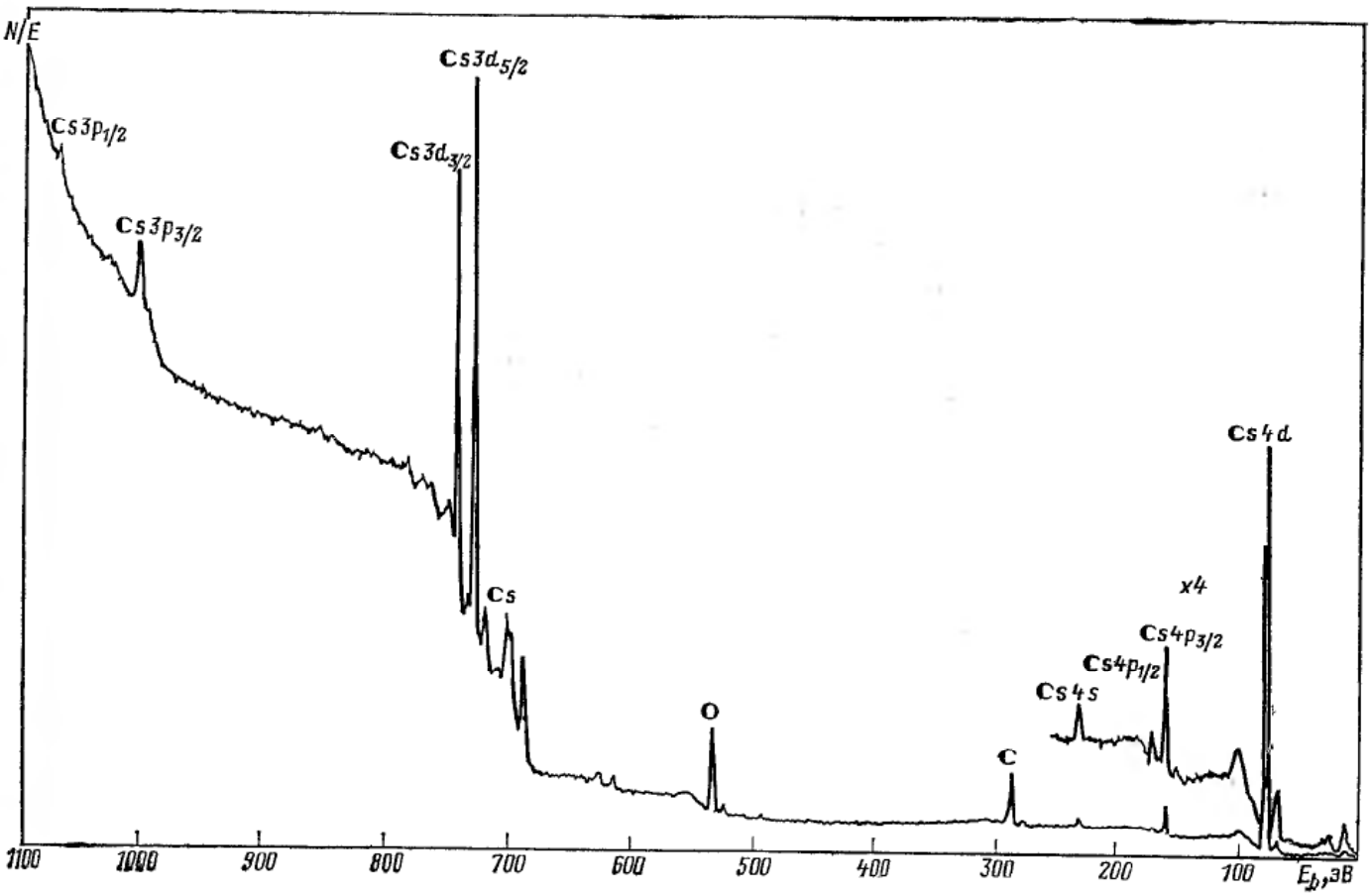


Рис. 25.29. Фотоэлектронный рентгеновский спектр цезия (мишень — CsOH) [39]:
по оси абсцисс отложена энергия связи электрона в атоме

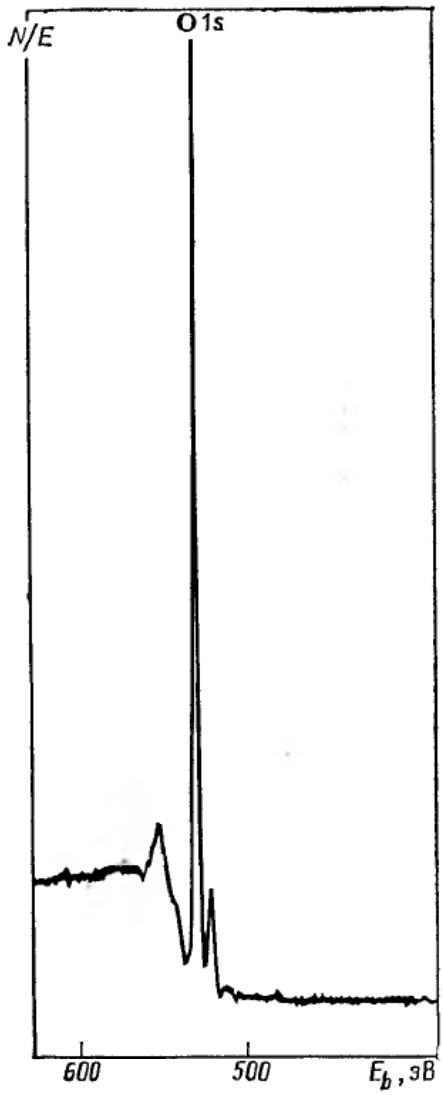


Рис. 25.30. Фотоэлектронный рентгеновский спектр кислорода (мишень — Al_2O_8) [39]:
по оси абсцисс отложена энергия связи

25.5. ВТОРИЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) — эмиссия электронов, вызываемая бомбардировкой тел электронами.

Основные закономерности ВЭЭ. Электроны, бомбардирующие поверхность тела, называются первичными; электроны, эмитированные телом, — вторичными. Вторичные электроны могут эмитироваться как со стороны облучаемой первичным пучком поверхности тела (ВЭЭ «на отражение»), так и — в тонкопленочных эмиттерах — со стороны поверхности, противоположной облучаемой (ВЭЭ «на прострел»). Основной характеристикой вторично-электронных эмиттеров является зависимость σ — коэффициента ВЭЭ от энергии E_p первичных электронов. Коэффициент ВЭЭ есть отношение числа электронов N_2, испускаемых телом, к числу падающих на него за то же время первичных электронов N_1: $\sigma=N_2/N_1=I_2/I_1$ (I_1, I_2 — первичный и вторичный токи соответственно). Значение σ зависит от свойств и структуры эмиттера, состояния его поверхности, энергии первичных электронов E_p и угла падения первичного пучка на поверхность эмиттера.

В потоке вторичных электронов имеются две группы электронов: истинно вторичные — электроны вещества, которые получили от первичного пучка энергию, достаточную для их выхода в вакуум, и отраженные (упруго и неупруго) — часть первичного пучка, отраженная от тела. При малых E_p ($E_p<10$ эВ) основную долю вторичных электронов составляют упруго отраженные электроны. С ростом E_p доля упруго отраженных электронов уменьшается и при $E_p>0{,}1$ кэВ дает лишь несколько процентов всей ВЭЭ. Истинно вторичные электроны имеют энергию от 0 примерно до 50 эВ. Наиболее вероятная энергия истинно вторичных электронов составляет 1,5—3,5 эВ. Неупруго отраженными условно принято считать вторичные электроны, энергия которых превышает 50 эВ. Отношение числа неупруго отраженных электронов к числу первичных электронов называется коэффициентом неупругого отражения $\eta=N_2$ ($E_p>50$ эВ)$/N_1$ (в N_2 входят и упруго отраженные электроны, но число их мало и на значение η не сказывается).

ВЭЭ из металлов и полупроводников. В металлах и полупроводниках максимальное значение σ_m обычно лежит в пределах 0,5—1,8 (табл. 25.19—25.21 и рис. 25.31—25.38). В некоторых диэлектриках (щелочно-галоидные кристаллы, MgO) σ_m значительно больше (10—35). Это обусловлено большой глубиной выхода вторичных электронов из этих материалов (20—100 нм). Наличие в диэлектрике сильного электрического поля, направленного от эмитирующей поверхности в глубь слоя (т. е. ускоряющего вторичные электроны), приводит к значительному увеличению σ. Сильное поле обычно создается электронной бомбардировкой тонкого слоя диэлектрика на проводящей подложке при такой энергии E_p, что $\sigma>1$. В результате поверхность диэлектрика заряжается положительно относительно металлической подложки. Ток ВЭЭ, возникающий в присутствии сильного электрического поля в эмиттере, состоит из двух компонент: малоинерционной (эта часть называется вторичной электронной эмиссией, усиленной полем, ее инерционность менее 10^{-6} с) и самоподдерживающейся, существующей и при отсутствии первичного пучка, после того как осуществлена первоначальная зарядка слоя.

Эффективные эмиттеры вторичных электронов. Эффективные эмиттеры фотоэлектронов: сурьмяно-цезиевый, многощелочной, фотоэмиттеры с ОЭС и другие — одновременно являются эффективными эмиттерами вторичных электронов. Широкое распространение получили также эффективные эмиттеры вторичных электронов на основе сплавов магния, бериллия и некоторых других элементов. Эти эмиттеры представляют собой слой оксида соответствующего металла на поверхности исходного сплава (Ag—Mg, Al—Mg, Cu—Be, Ni—Be и т. п.). В канальных вторичных электронных умножителях используются эмиттеры вторичных электронов из проводящих стекол.

Характеристики эффективных эмиттеров вторичных электронов приведены в табл. 25.22—25.24 и на рис. 25.39—25.43, где $E_{p\,m}$ — энергия первичных электронов, при которой достигается максимальное значение коэффициента вторичной электронной эмиссии σ_m.

Таблица 25.19. **Коэффициенты ВЭЭ для различных поликристаллов [22]**

Элемент	σ_m	E_{pm}, эВ	Элемент	σ_m	E_{pm}, эВ
Алюминий	0,88	300	Никель	1,34	600
Барий	0,83	400	Ниобий	1,2	370
Бериллий	0,55	200	Олово	1,43	600
Бор	1,2	150	Осмий	1,7	750
Висмут	1,32	900	Палладий	1,75	550
Вольфрам	1,4	700	Платина	1,8	850
Галлий	1,08	500	Рений	1,6	750
Гафний	1,16	700	Ртуть	1,63	700
Германий	1,08	400	Селен	1,23	300
Железо	1,3	350	Серебро	1,70	800
Золото	1,81	900	Скандий	0,83	200—250
Индий	1,41	500	Свинец	1,4	700
Иридий	1,8	800	Стронций	0,72	400
Иттрий	0,93	350	Сурьма	1,19	600
Кадмий	1,59	800	Таллий	1,30	700
Калий	0,53	170	Теллур	1,22	450
Кальций	0,60	200	Титан	0,83	300
Кремний	1,03	300	Торий	1,14	600—1000
Лантан	1,03	500	Углерод (графит)	1,0	300
Литий	0,48	75			
Магний	0,88	300	Цезий	0,72	400
Медь	1,40	700	Цинк	1,41	700
Молибден	1,23	600	Цирконий	1,1	350

Таблица 25.20. **Коэффициенты ВЭЭ для некоторых оксидов и халькогенидов [22]**

Соединение	σ_m	E_{pm}, эВ
Оксид:		
бора	2,5—2,8	250
сурьмы	1,6—1,8	—
теллура	1,7—1,85	600
свинца	1,8—2,0	600
Селенид:		
висмута	1,25—1,35	600—700
индия	1,3—1,5	300—350
кальция	1,4—1,6	300—350
мышьяка	1,1—1,4	400
сурьмы	1,2—1,4	500—600
Сернистая сурьма	1,1—1,35	450—500
Сернистый:		
мышьяк	1,5—1,8	300
свинец	1,25—1,3	500
германий	1—1,05	400
Теллурид:		
мышьяка	1,1—1,3	400
сурьмы	1,2—1,35	700—800

Таблица 25.21. **Анизотропия вторично-эмиссионных свойств монокристаллов [4]**

Металл	Параметр ВЭЭ	Плоскости монокристаллов						Поликристаллы
		(100)	(111)	(110)	(116)	(112)	(102)	
Вольфрам	σ_m	1,66	1,58	1,48	1,39	—	—	1,42
	E_{pm}, эВ	780	670	550—720	820	—	—	700
Железо	σ_m	—	—	1,34	—	—	—	1,30
	E_{pm}, эВ	—	—	450	—	—	—	350
Иридий	σ_m	2,11	1,85	1,95	—	—	—	1,80
	E_{pm}, эВ	650	650	650	—	—	—	800
Молибден	σ_m	1,52—1,58	1,4—1,45	1,35	—	1,14	125	1,28
	E_{pm}, эВ	350—400	350—510	400—460	—	720—760	550	400
Никель	σ_m	—	1,52	—	—	—	—	1,34
	E_{pm}, эВ	—	770	—	—	—	—	600
Ниобий	σ_m	1,38	1,29	1,25—1,34	—	—	—	1,20
	E_{pm}, эВ	350—820	360	380—880	—	—	—	370
Тантал	σ_m	1,43	—	—	—	1,25	—	1,3
	E_{pm}, эВ	750	—	—	—	740	—	700

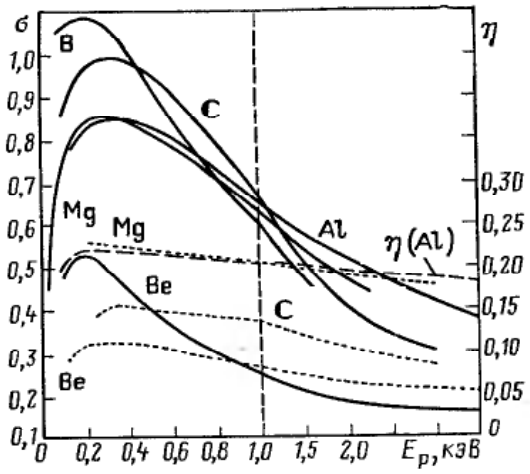


Рис. 25.31. Зависимость коэффициента ВЭЭ σ (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов η от энергии первичных электронов для бора, углерода, бериллия, магния и алюминия [22]

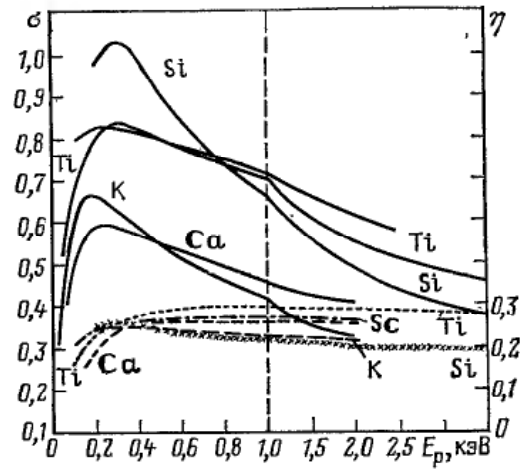


Рис. 25.32. Зависимость коэффициента ВЭЭ σ (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов η от энергии первичных электронов для калия, кальция, скандия, титана и кремния [22]

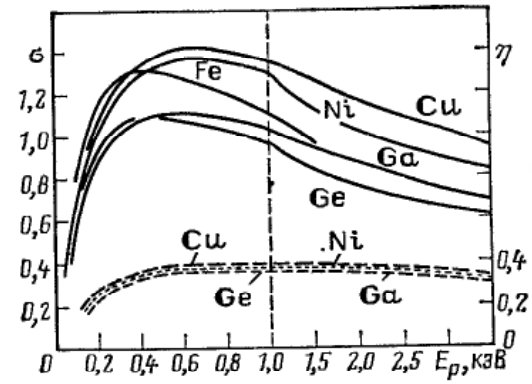


Рис. 25.33. Зависимость коэффициента ВЭЭ σ (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов η от энергии первичных электронов для железа, никеля, меди, галлия и германия [22]

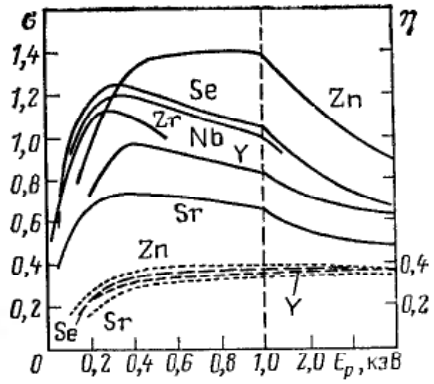


Рис. 25.34. Зависимость коэффициента ВЭЭ δ (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов η от энергии первичных электронов для цинка, селена, стронция, иттрия, циркония и ниобия [22]

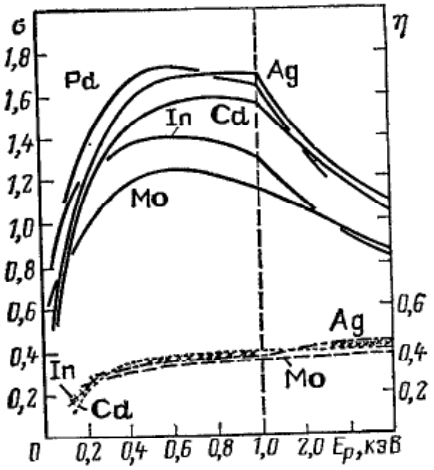


Рис. 25.35. Зависимость коэффициента ВЭЭ σ (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов η от энергии первичных электронов для молибдена, палладия, серебра, кадмия и индия [22]

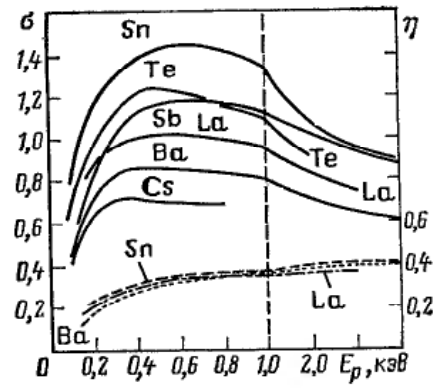


Рис. 25.36. Зависимость коэффициента ВЭЭ σ (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов η от энергии первичных электронов для олова, сурьмы, теллура, цезия, бария и лантана [22]

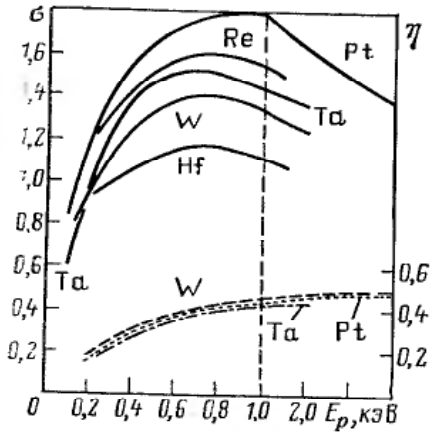


Рис. 25.37. Зависимость коэффициента ВЭЭ σ (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов η от энергии первичных электронов для гафния, тантала, вольфрама, рения и платины [22]

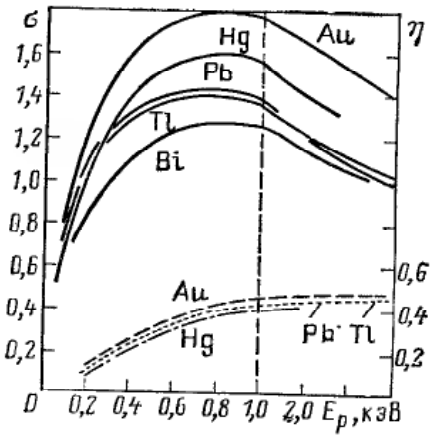


Рис. 25.38. Зависимость коэффициента ВЭЭ σ (сплошные линии) и коэффициента неупругого отражения электронов η от энергии первичных электронов для золота, ртути, таллия, свинца и висмута [22]

Таблица 25.22. **Максимальные значения коэффициента ВЭЭ для эффективных эмиттеров** [13]

Эмиттер	σ_m	E_{pm}, кэВ
$CsNa_2KSb$	39	1,8
Cs_3Sb	10	0,5
Cu—Be	6—8	0,6
Ag—Mg	12	0,6
GaP (100) (монокристалл) — CsO	500	12
GaP (поликристалл) — CsO	200	4
GaAs (100) — CsO	540	20
Si (100) — CsO	950	20
$GaAs_{0,5}P_{0,5}$ (100) — CsO	110	1,7
CsCl	20	2
CsI	20—35	1,7—5,5
CaF_2	5	1,4
MgO	20	0,9

Таблица 25.23. **Коэффициенты ВЭЭ эффективных эмиттеров «на прострел»** [24]

Эмиттер	σ при E_p, кэВ				
	2	5	10	15	20
KCl	0,5	4,2	2	2	2
MgO	2	5	4	—	—
Si—CsO	0	50	200	520	725
GaAs—CsO	0	2	15	60	112

Таблица 25.24. **Коэффициенты ВЭЭ для эффективных эмиттеров при малых энергиях первичных электронов E_p** [24]

Эмиттер	σ при E_p, эВ		
	300	600	1000
CuBe	2—4	4—6	7—12
CuAlMg	2—4	3—7	7—16
Cs_3Sb	2—6	4—15	3—12
$CsNa_2KSb$	3—5	7—11	10—19
GaP (поликристалл) —CsO	28	50	68
GaAs(поликристалл) —CsO	26	42	65

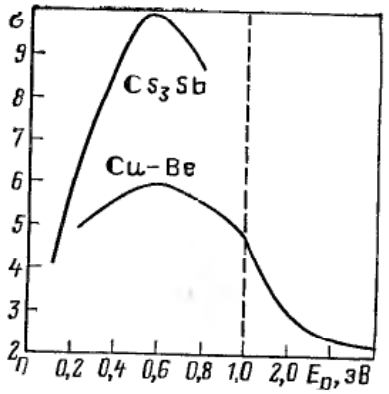


Рис. 25.39. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для Cs_3Sb и медно-бериллиевого сплава [15]

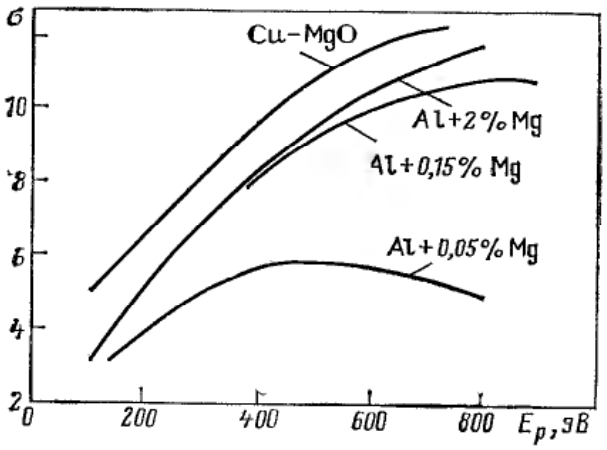


Рис. 25.40. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для алюминий-магниевого и медно-магниевого сплавов [15]

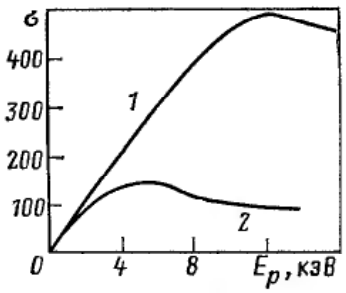


Рис. 25.41. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для моно- (*1*) и поликристаллического (*2*) GaP—CsO-эмиттеров

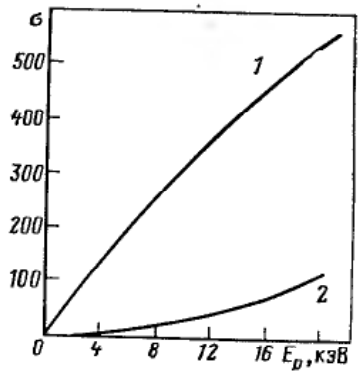


Рис. 25.42. Зависимость коэффициента ВЭЭ для GaAs—CsO-эмиттеров от энергии первичных электронов «на отражение» (*1*) и «на прострел» (d=3÷4 мкм) (*2*) [26]

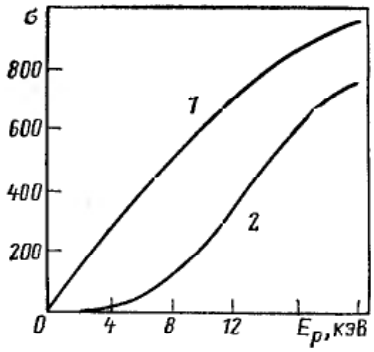


Рис. 25.43. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для Si—CsO-эмиттеров «на отражение» (*1*) и «на прострел» (d=4÷5 мкм) (*2*) [25]

Эмиссия оже-электронов (ЭОЭ). В спектрах вторичных электронов имеются узкие линии, соответствующие вторичным электронам, возникшим в результате оже-процесса, протекающего при бомбардировке тела первичными электронами, которые вышли из тела без рассеяния (табл. 25.25 и рис. 25.44—25.46). Этот процесс состоит в следующем. При возбуждении атома первичными электронами происходит переход электрона с какого-либо внутреннего уровня (например, K) в свободное состояние выше уровня вакуума. Освободившийся

Таблица 25.25. **Энергия основных пиков оже-электронов $E_{0,э}$ для различных элементов и относительная оже-чувствительность ξ** [38]

Продолжение табл. 25.25

Элемент	$E_{0,э}$, эВ	ξ* при E_p = 3 кэВ
KLL-переход		
$_{3}$Li	43	—
$_{4}$Be	104	0,14
$_{5}$B	179	0,15
$_{6}$C	272	0,2
$_{7}$N	379	0,3
$_{8}$O	503	0,5
$_{9}$F	647	0,48
$_{11}$Na	990	0,22
$_{12}$Mg	1180	0,11
$_{13}$Al	1396	0,05
LMM-переход		
$_{13}$Al	68	0,24
$_{14}$Si	92	0,35
$_{15}$P	120	0,55
$_{16}$S	152	0,8
$_{17}$Cl	181	1
$_{18}$Ar	215	—
$_{19}$K	252	0,8
$_{20}$Ca	291	0,5
$_{21}$Sc	340	0,35
$_{22}$Ti	418	0,45
$_{23}$V	473	0,45
$_{24}$Cr	529	0,32
$_{25}$Mn	589	0,23
$_{26}$Fe	703	0,21
$_{27}$Co	775	0,27
$_{28}$Ni	848	0,26
$_{29}$Cu	920	0,22
$_{30}$Zn	994	0,17
$_{31}$Ga	1070	0,13
$_{32}$Ge	1147	0,1
$_{33}$As	1228	0,08
$_{34}$Se	1315	0,065
$_{35}$Br	1396	0,05
$_{37}$Rb	1565	0,03
$_{38}$Sr	1649	0,025
$_{39}$Y	1746	0,02
MNN-переход		
$_{40}$Zr	147	0,22
$_{41}$Nb	167	0,26
$_{42}$Mo	186	0,33
$_{44}$Ru	273	0,5
$_{45}$Rh	302	0,65
$_{46}$Pd	330	0,8
$_{47}$Ag	351	1
$_{48}$Cd	376	1
$_{49}$In	404	0,95
$_{50}$Sn	430	0,8
$_{51}$Sb	454	0,6
$_{52}$Te	483	0,45
$_{53}$I	511	0,32
$_{54}$Xe	532	—
$_{55}$Cs	563	0,16
$_{56}$Ba	584	0,12
$_{57}$La	625	0,09
$_{58}$Ce	661	0,065
$_{59}$Pr	669	0,05
$_{60}$Nd	730	0,04
$_{62}$Sm	814	0,028
$_{63}$Eu	858	0,026
$_{64}$Gd	895	0,024
$_{65}$Tb	1073	0,024
$_{66}$Dy	1126	0,024
$_{67}$Ho	1175	0,024
$_{68}$Er	1393	0,025
$_{69}$Tm	1449	0,027
$_{70}$Yb	1514	0,03
$_{71}$Lu	1573	0,036
$_{72}$Hf	1624	0,045
$_{73}$Ta	1680	0,055
$_{74}$W	1736	0,05
$_{75}$Re	1799	0,04
$_{77}$Ir	1908	0,027
$_{78}$Pt	1967	0,022
$_{79}$Au	2024	0,019
$_{80}$Hg	2078	—

* Относительная оже-чувствительность серебра (E = 351 эВ) принята равной единице.

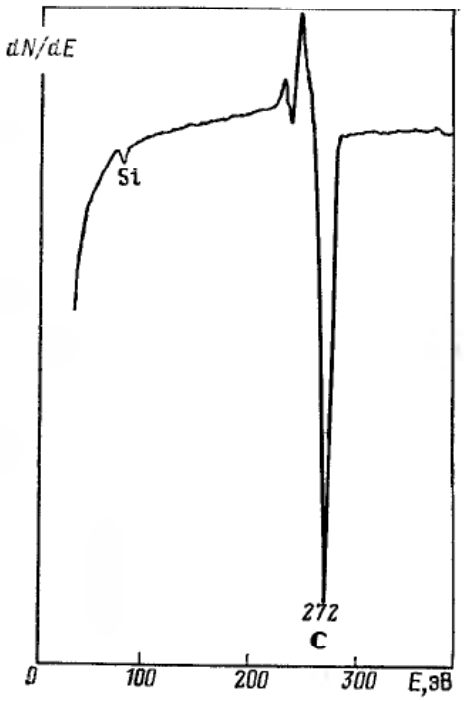


Рис. 25.44. Оже-спектр углерода [42]

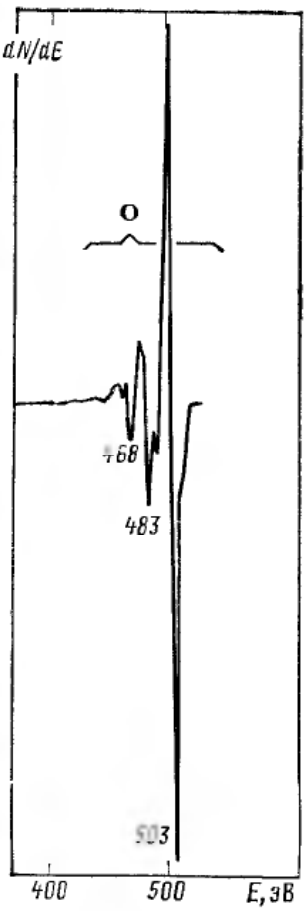


Рис. 25.45. Оже-спектр кислорода (мишень MgO) [42]

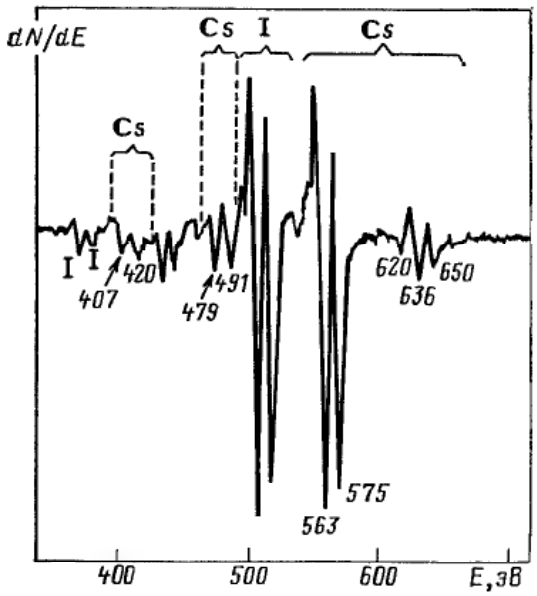


Рис. 25.46. Оже-спектр цезия (мишень CsI) [42]

уровень заполняется электроном с вышележащего уровня (например, L). Выделившаяся при этом энергия, которая приближенно равна $E_K - E_L$ (где E_K и E_L — энергия связи электронов на уровнях K и L соответственно), испускается в виде рентгеновского кванта либо передается другому электрону, находящемуся на соседнем уровне. Такой процесс приводит к эмиссии из атома электрона с энергией E_{KLL}, приближенно равной $E_K - 2E_L$. Кроме серии KLL интенсивны также оже-серии LMM, MNN и др.

Энергия оже-пика характеризует данный атом, поэтому анализ спектров оже-электронов позволяет получить информацию о составе приповерхностной области твердого тела, откуда происходит ЭОЭ. Энергия оже-электронов лежит в диапазоне 30—2000 эВ. Средняя длина свободного пробега электронов с такими же энергиями составляет 0,5—2 нм, так что спектры оже-электронов отражают свойства приповерхностного слоя толщиной до пяти монослоев. Амплитуда оже-пика пропорциональна концентрации атомов данного сорта на поверхности твердого тела и эффективности оже-переходов, которая характеризуется величиной, называемой оже-чувствительностью. Она определяется числом вторичных оже-электронов с данной энергией, испущенных данным элементом, в расчете на число первичных электронов и зависит от энергии первичных электронов. Анализ спектров оже-электронов лежит в основе электронной оже-спектроскопии (ЭОС) — основного метода изучения состава поверхности твердых тел.

25.6. ПОЛЕВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Полевая (туннельная, автоэлектронная) эмиссия (ПЭ) — испускание телами электронов под действием сильного внешнего электрического поля у их поверхности. Если внешнее электрическое поле достаточно велико для того, чтобы потенциальной порог на границе тела превратился в барьер конечной и малой ширины ($\mathcal{E} \geqslant 10^7$ В/см), то становится возможным просачивание электронов сквозь барьер (квантовомеханическое туннелирование) и выход их в вакуум. При этом электроны непосредственно после прохождения сквозь барьер имеют ту же энергию, что и внутри тела, а электрическое поле совершает работу только на ускорение электронов в вакууме в межэлектродном промежутке между эмиттером

и анодом и на нагревание эмиттера проходящим по нему эмиссионным током. Плотность тока ПЭ, А/см², из металла при $T \ll 20°C$ описывается формулой [27] ($\mathcal{E}$ — в В/см):

$$j = \frac{e^2\mathcal{E}^2}{8\pi h\varphi} \exp\left[-\frac{8\pi}{3}\frac{(2m)^{1/2}}{h}\frac{(e\varphi)^{3/2}}{e\mathcal{E}}\theta(y)\right],$$

где $\theta(y)$ — функция Нордгейма (табл. 25.26), в которой аргументом является относительное снижение работы выхода внешним электрическим полем напряженностью E в соответствии с эффектом Шоттки:

$$y = \Delta(e\varphi)/e\varphi = (e\mathcal{E})^{1/2}/\varphi.$$

Если $e\varphi$ — в эВ, а $\mathcal{E}$ — в В/см, то плотность тока ПЭ (в А/см²)

$$j = 1{,}54\cdot 10^{-6}\frac{\mathcal{E}^2}{e\varphi}\exp\left[-\frac{6{,}79\cdot 10^7 (e\varphi)^{3/2}}{\mathcal{E}}\times\right.$$
$$\left.\times\,\theta\left(\frac{3{,}62\cdot 10^{-4}\mathcal{E}^{1/2}}{e\varphi}\right)\right].$$

Отсюда видно, что ПЭ зависит от электрического поля так же, как ТЭ зависит от температуры: $\ln(j/\mathcal{E}^2) = f(1/\mathcal{E})$ (рис. 25.47). При высоких температурах плотность тока ПЭ возрастает с T, особенно сильно в области малых (но уже вызывающих ПЭ) электрических полей. Распределение по энергиям электронов, эмитируемых из металла, при ПЭ при низких температурах эмиттера начинается от энергии, соответствующей уровню Ферми в металле (принимаемому за нуль), и простирается в область отрицательных энергий. Ширина распределения на половине высоты составляет около 0,5 эВ (рис. 25.48). При возрастании температуры энергетический спектр эмитируемых электронов расширяется в сторону положительных энергий. ПЭ полупроводников обладает рядом особенностей, связанных с распределением электронов по энергиям в них, с проникновением внешнего электрического поля в полупроводник и с сильной термо- и фоточувствительностью полупроводников, оказывающей влияние на ток ПЭ (рис. 25.49) [28, 29]. Токи ПЭ с большой плотностью удается получать с эмиттеров, имеющих форму острия. Предельная плотность тока, еще не разрушающего острие, $j_{кр}$ возрастает с увеличением угла при вершине эмитирующего конуса, так как с увеличением этого угла улучшается отвод теплоты от острия (табл. 25.27, рис. 25.50). В очень сильных электрических полях, когда плотность тока ПЭ достигает 10^8—10^9 А/см², локальные участки катода, из которых происходит эмиссия, (острия) в результате сильного разогрева взрываются, образуя плотную плазму, расширяющуюся со скоростью $v \approx 10^6$ см/с. Этот процесс сопровождается возникновением интенсивной эмиссии (взрывная электронная эмиссия, рис. 25.51) [30]. Ток I, А, взрывной электронной эмиссии при взрыве одиночного острия

$$I = 3{,}7\cdot 10^{-5} U^{3/2} vt/(d - vt),$$

где U — напряжение между катодом и анодом в процессе взрывной эмиссии, В; d — расстояние между ними, см; t — время от момента приложения импульса напряжения ($t < d/v$).

ПЭ используется в некоторых вакуумных электронных приборах, в полевой электронной и ионной микроскопии, взрывная электронная эмиссия — в сильноточных ускорителях электронов и в импульсных источниках рентгеновского излучения высокой интенсивности [30].

Таблица 25.26. **Функция Нордгейма $\theta(y)$ [27]**

y	$\theta(y)$	y	$\theta(y)$
0	1,0000	0,55	0,6351
0,05	0,9948	0,6	0,5768
0,1	0,9817	0,65	0,5152
0,15	0,9622	0,7	0,4504
0,2	0,9370	0,75	0,3825
0,25	0,9068	0,8	0,3117
0,3	0,8718	0,85	0,2379
0,35	0,8322	0,9	0,1613
0,4	0,7888	0,95	0,0820
0,45	0,7413	1	0
0,5	0,6900		

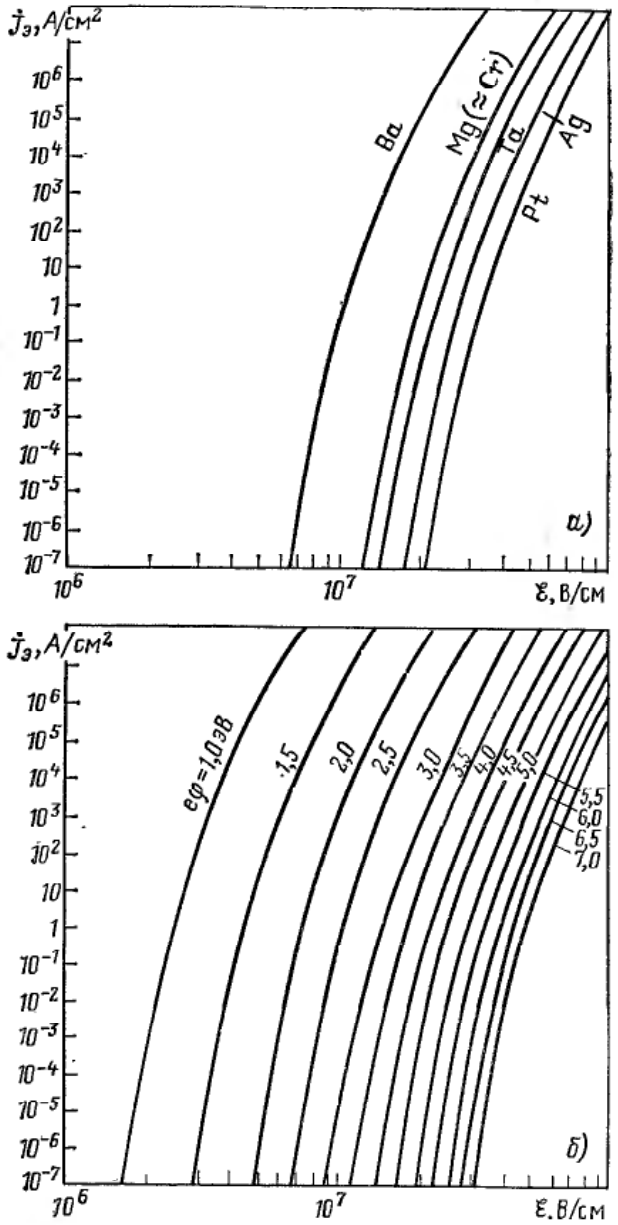


Рис. 25.47. Зависимость плотности тока ПЭ от напряженности электрического поля для некоторых металлов (*а*) и эмиттеров с различной работой выхода (*б*) [6]

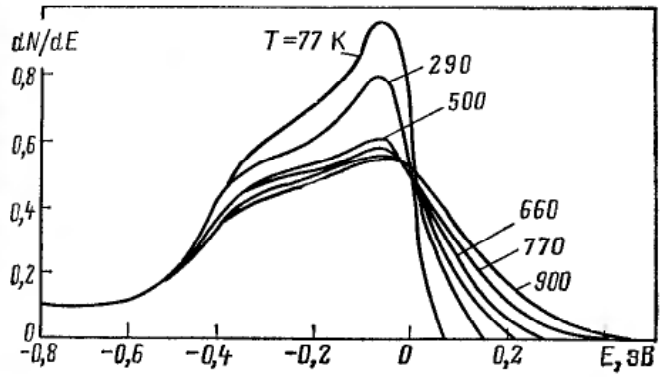


Рис. 25.48. Распределение по энергиям электронов при ПЭ из вольфрамового острия с ориентацией по оси <100> при различных температурах эмиттера [31]

Таблица 25.27. **Значения экспериментально измеренных предельных плотностей токов ПЭ с одноострийных катодов** [28]

Материал катода	Длительность прикладываемого напряжения, с	Предельная плотность тока, А/см²
W	Постоянно действующее напряжение	10^7
W	$10—10^{-3}$	$2 \cdot 10^7$
W	$10^{-5}—10^{-6}$	$5 \cdot 10^7—10^8$
W	10^{-7}	$3 \cdot 10^8—5 \cdot 10^8$
W	$10^{-8}—10^{-9}$	10^9
W—Zr	$4 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^9—5 \cdot 10^9$
Ta, Re	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^7$
LaB_6	$3 \cdot 10^{-6}$	$10^7—10^8$
ZrC	$3 \cdot 10^{-6}$	$10^7—10^8$

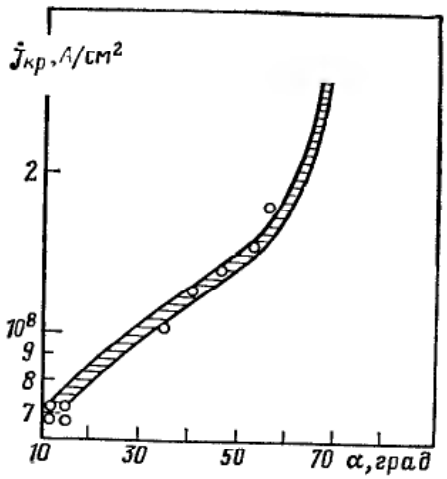


Рис. 25.50. Зависимость критической (наибольшей неразрушающей эмиттер) плотности тока ПЭ металлического острия от угла раствора конуса катода [28]. Материал катода — вольфрам, длительность импульсов тока 3,5 мкс, частота повторения 50 $с^{-1}$:
кружки — эксперимент, заштрихованная полоса — расчет

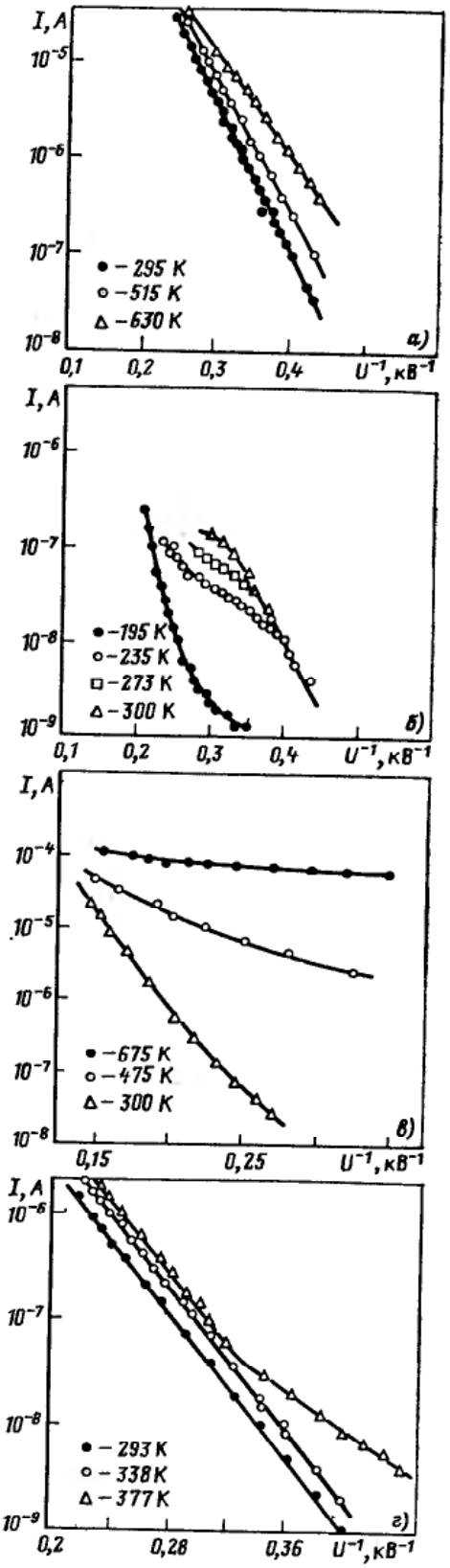


Рис. 25.49. Вольт-амперные характеристики тока ПЭ полупроводников при различных температурах [29]:
а — низкоомный германий *n*-типа; *б* — высокоомный германий *p*-типа: *в* — сульфид цинка; *г* — сульфид кадмия

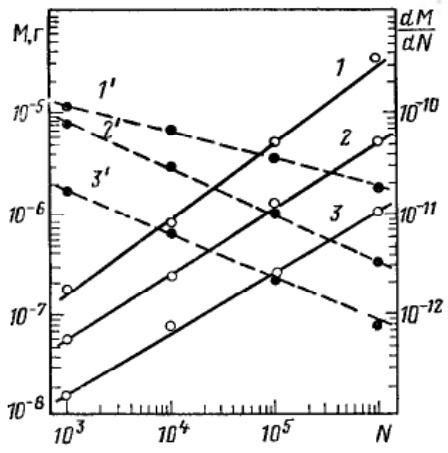


Рис 25.51. Расход массы медных острий M при многократных включениях тока взрывной полевой эмиссии [30]:

N — число включений, U=30 кВ; расстояние катод-анод 3 мм; угол раствора конуса катода α=6°; *1, 3* — $M(N)$; *1′, 3′* — dM/dN. Длительности импульсов: *1, 1′*—5·10⁻⁸ с; *2, 2′*— 2·10⁻⁸ с; *3, 3′* — 5·10⁻⁹ с

25.7. ИОННАЯ И ИОННО-ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Ионная эмиссия — испускание телом ионов химических элементов, входящих в состав тела, при его нагревании (термоионная эмиссия) или при бомбардировке его поверхности другими частицами: электронами (электронно-ионная эмиссия), ионами (вторичная ионная эмиссия) или при облучении фотонами (фотодесорбция). Под действием ионной бомбардировки может возникать также электронная эмиссия (ионно-электронная эмиссия, табл. 25.28 и рис. 25.52). Интенсивную термоионную эмиссию обнаруживают тела с каркасно-полостной структурой кристаллической решетки (цеолиты, алюмосиликаты и другие), в полости которой введены атомы щелочных металлов. Эти атомы слабо связаны с основной решеткой и могут при нагревании легко перемещаться внутри тела, диффундируя к поверхности и испаряясь с нее. На основе таких материалов изготавливаются эффективные твердотельные источники ионов (табл. 25.29 и рис. 25.53, 25.54). При вторичной ионной эмиссии некоторая доля частиц эмитируется в виде нейтральных атомов.

Основные характеристики ионной эмиссии: j_i — плотность ионного тока; S — коэффициент распыления — отношение общего числа распыленных частиц (нейтральных и ионизованных) к числу первичных ионов; K^+ — коэффициент вторичной ионной эмиссии—отношение числа вторичных ионов с определенным отношением заряда к массе к числу первичных ионов (для неэлементарных мишеней под коэффициентом вторичной ионной эмиссии понимают величину $\gamma_i^+ = K^+/C_i$, где C_i — относительная концентрация атомов i-го сорта в мишени); $\beta^+ = K^+/S$ — коэффициент ионизации (табл. 25.30—25.32). Вторичная ионная эмиссия широко используется в масс-спектроскопии вторичных ионов для анализа состава приповерхностных слоев твердых тел [34].

Таблица 25.28. **Коэффициенты ионно-электронной эмиссии металлов γ, электрон/ион [35] (данные получены графической интерполяцией между экспериментально измеренными значениями)**

Мишень	Первичный ион	Энергия первичных ионов, кэВ									
		2	3	4	7	10	15	20	30	40	50
Li	H^+	0,475	0,560	0,650	0,830	0,965	1,12	1,23	1,36	1,46	1,55
	H_2^+	0,260	0,320	0,365	0,465	0,550	0,680	0,775	0,945	1,07	1,16
	He^+	0,465	0,525	0,590	0,740	0,880	1,10	1,27	1,54	1,77	1,95
Al	H^+	0,225	0,310	0,380	0,560	0,700	0,875	1,01	1,23	1,34	1,38
	H_2^+	0,087	0,132	0,156	0,230	0,310	0,450	0,555	0,745	0,885	0,955
	He^+	0,280	0,330	0,380	0,510	0,620	0,765	0,885	1,10	1,31	—
Cr	H^+	0,280	0,360	0,430	0,580	0,710	0,880	1,04	1,26	1,36	1,42
	H_2^+	0,240	0,270	0,305	0,375	0,450	0,540	0,635	0,810	0,940	1,01
	He^+	0,310	0,420	0,485	0,650	0,780	0,960	1,10	1,42	1,69	1,94
Cu	H^+	—	0,420	0,480	0,650	0,780	0,960	1,08	1,29	1,45	1,57
	H_2^+	0,162	0,210	0,265	0,380	0,470	0,580	0,670	0,830	0,960	1,08
	He^+	—	0,390	0,455	0,620	0,800	1,04	1,18	1,44	1,70	—
Ag	H^+	—	0,650	0,810	1,15	1,42	1,70	1,89	2,17	2,33	—
	H_2^+	0,225	0,295	0,375	0,610	0,800	1,03	1,20	1,50	1,67	1,78
	He^+	0,360	0,450	0,570	0,910	1,21	1,65	2,00	2,50	2,89	—
Au	H^+	0,360	0,540	0,680	0,980	1,22	1,46	1,64	1,77	2,03	2,15
	H_2^+	0,138	0,240	0,325	0,550	0,720	0,930	1,09	1,38	1,59	1,70
	He^+	0,315	0,410	0,510	0,810	1,09	1,52	1,83	2,34	2,68	—

Мишень	Первичный ион	Энергия первичных ионов, кэВ							
		50	75	100	125	150	175	200	225
W	H^+	1,54	1,62	1,64	1,65	1,64	1,61	1,56	1,53 [36]

Таблица 25.29. **Термоионные свойства цеолитов и алюмосиликатов щелочных металлов** [33]

Материал	T, °С	Эмитируемые ионы	Плотность ионного тока, мА/см²
Цеолит	1100	Cs^+	12
Алюмосиликат Li ($Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	1100	Li^+	0,6
Алюмосиликат Rb ($Rb_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	1160	Rb^+	0,4
Алюмосиликат Rb + + Mo (10%)	1160	Rb^+	2—5
Алюмосиликат Na ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	1200	Na^+	2
Алюмосиликат Na + + W (10%)	1200	Na^+	20

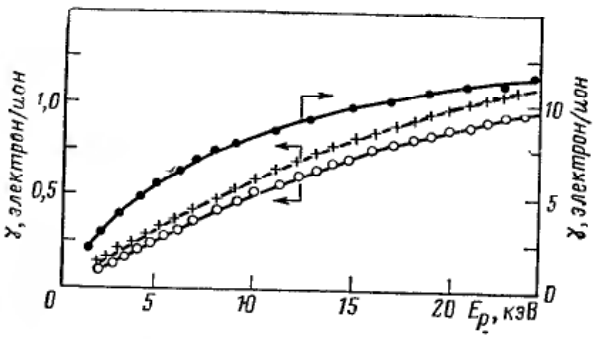


Рис. 25.52. Зависимость коэффициента ионно-электронной эмиссии γ при бомбардировке мишеней ионами аргона $^{40}Ar^+$ от энергии первичных E_p [23]:

крестики — поликристаллический молибден; светлые кружки — поверхности (111) монокристалла германия; темные кружки — монокристалл хлористого натрия. Измерения проведены при давлении $p \leq 10^{-6}$ Па. Поверхности мишеней подвергнуты ионному травлению в вакууме ($p \sim 10^{-7}$ Па) при T=350°С (Ge и NaCl), молибденовая мишень предварительно отожжена при таком же давлении при T=1700 К

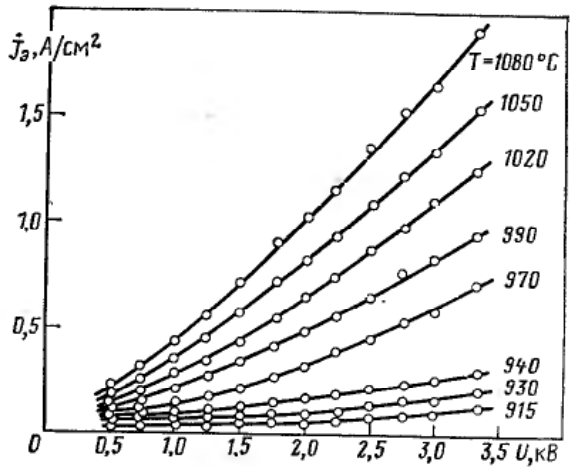


Рис. 25.53. Вольт-амперные характеристики источника ионов цезия из алюмосиликата цезия ($Cs_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) в импульсном режиме при различных температурах катода [32]. Расстояние катод—анод 2 мм, длительность импульсов тока 10 мкс, частота повторения 25 $с^{-1}$

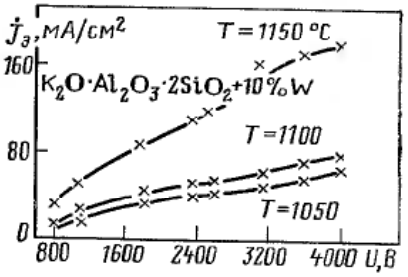


Рис. 25.54. Вольт-амперные характеристики источника ионов K^+ на основе алюмосиликата калия с присадкой вольфрама ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$+10%W) в импульсном режиме при разных температурах источника [33]. Значения ионного тока усреднены по импульсу. Длительность импульсов 700 мкс, частота повторения 10 $с^{-1}$

Таблица 25.30. **Основные параметры вторичной ионной эмиссии пленок чистых металлов** [34]

Первичный ион	Параметр	Металл							
		Al	Ti	Mn	Ni	Cu	Sn	Ta	Au
Ar^+	β^+, 10^{-4} ион/атом	110	92	22	6,4	1,9	0,66	6,9	0,056
	S, атом/ион	3,7	2,3	3,5	6,1	8,5	8,3	2,9	12
	K^+, 10^{-4} ион/ион	410	212	77	39	16	565	20	0,71
He^+	β^+, 10^{-4} ион/атом	—	337	26,8	9,8	4,73	4,15	50	0,185
	S, атом/ион	—	0,8	1,1	1,5	1,9	2,8	0,68	3,2
	K^+, 10^{-4} ион/ион	—	270	29,8	14,7	9	11,6	34	0,59
O_2^+	β^+, 10^{-4} ион/атом	9600	5900	265	63,5	14	9,3	250	0,32
	S, атом/ион	1,6	1,1	2,3	3,3	4,3	5,1	1,1	6,5
	K^+, 10^{-4} ион/ион	15300	5900	610	210	60	47,5	275	2,08

Таблица 25.31. **Относнтельные коэффициенты вторичной нонной эмиссни наиболее распространенных металлов при бомбардировке ионами Ar^+, He^+ и O^+ (энергия первичных ионов 8 кэВ, за эталон принято железо при бомбардировке нонами Ar^+ [34], элементы расположены по латинскому алфавнту)**

Элемент	Первичный ион			Элемент	Первичный ион		
	Ar^+	He^+	O^+		Ar^+	He^+	O^+
Ag	0,108	0,07	0,135	Dy	1,88	2,84	23,1
Al	9,62	62,2	447	Er	4,50	2,03	15,8
Au	0,012	0,025	0,051	Fe	1,00	0,872	15,8
Be	2,19	15,5	163	Gd	2,28	1,47	13,2
Bi	0,358	0,13	0,464	Hf	2,25	1,33	8,58
Cd	0,019	0,016	0,106	Ho	2,88	3,03	21,4
Ce	0,40	0,773	14,7	In	1,50	30	53,8
Co	1,22	0,37	5,97	Y	2,87	8,4	51,2
Cr	1,01	2,95	41,6	Yb	1,05	2,8	25,2
Cu	0,262	0,235	1.26	La	0,49	0,725	12,8

Продолжение табл. 25.31

Элемент	Первичный ион			Элемент	Первичный ион		
	Ar^+	He^+	O^+		Ar^+	He^+	O^+
Lu	15,6	2,64	16.6	Sm	0,275	1,84	19,5
Mg	11,4	13,3	86	Sn	0,094	0,202	0,558
Mn	2,15	0,95	13,5	Ta	0,186	0,853	5,43
Mo	0,385	1,86	25,2	Tb	7,00	3,63	23,8
Nb	1,16	4,05	35,6	Ti	1,56	7,14	127
Nd	4,13	1,11	17,8	Tu	1,68	6,7	22,1
Ni	0,98	0,415	4,42	V	2,75	13,1	200
Pb	0,086	1,08	1,22	W	0,187	0,447	5,83
Pd	0,042	0,033	1,55	Zn	0,034	0,107	0,918
Pt	0,112	0,013	0,076	Zr	0,296	2,08	28,2
Pr	1,03	2,61	22,2				
Re	0,65	2,14	20,5				
Rh	0,89	0,556	24				
Ru	0,76	0,724	20,6				
Sc	7,75	31	205				

Таблица 25.32. **Основные параметры вторичной ионной эмиссни карбидов [34] (бомбардировка первичными нонами Ar^+ с энергией 8 кэВ, плотность потока первичных ионов 10^{-3} А/см^2)**

Параметр	TiC	VC	CrC_2	ZrC	NbC	MoC	HfC	TaC	WC
S	3,0	2,9	3,3	2,3	2,9	2,9	4,0	2,8	2,5
γ^+_{Me}	21,0	24	14	2,7	6,7	1,9	1,3	0,82	0,52
γ^+_C	0,056	0,034	0,033	0,047	0,054	0,030	0,056	0,030	0,080
β^+_{Me}	0.20	0,24	0,12	0,033	0,067	0,018	0,009	0,008	0,006
β^+_C	0,007	0,005	0,004	0,008	0,007	0,004	0,005	0,004	0,012

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В.** Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966.
2. **Фоменко В. С.** Эмиссионные свойства материалов: Справочник. — 4-е изд. Киев: Наукова думка, 1981.
3. **Michaelson H. B.**//J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48, No 11. P. 4729—4733.
4. **Электрические** и эмиссионные свойства сплавов/Е. М. Савнцкий, И. В. Буров, С. В. Пирогова, Л. Н. Литвак. М.: Наука, 1978.
5. **Haas G. A., Shin A., Marrian C. R. K.**//Appl. Surface Sci. 1983. Vol. 16, No 1—2. P. 139—162.
6. **Ardenne M.** Tabellen zur Angewandten Physik Auflage. Berlin: VEB Verlag der Wissenschaften, 1962. Bd. 1.
7. **Термоэлектронные** катоды/Г. А. Кудинцева, А. И. Мельников, А. В. Морозов. Б. П. Никонов. М.: Энергня, 1966.
8. **Futamoto M., Nakazawa M., Usami K. e. a.**// J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51, No 7. P. 3869—3876.
9. **Houston J. M., Webster H. F.**//Advances in Electronics and Electron Phys. 1962. Vol. 17. P. 125—206.
10. **Lipeles R. A., Kan H. K. A.**//Appl. Surface Sci. 1983. Vol. 16. No 1—2. P. 189—206.
11. **Кульварская Б. С.**//Радиотехника и электроника. 1970. Т. 15, № 8. С. 1717—1720.
12. **Нникопов Б. П.** Оксидный катод. М.: Энергия, 1979.
13. **Soukup R. J.**//J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48, No 3. P. 1098—1100
14. **Ашкинази Л. А., Соболева Н. А.**//Итоги науки и техники. Сер. Электроника. 1983. Т. 15. С. 154—216.
15. **Соболева Н. А., Меламид А. Е.** Фотоэлектронные приборы. М.: Высшая школа, 1974.
16. **Соммер А.** Фотоэмиссионные материалы. Пер. с англ. М.: Энергия, 1973.
17. **Белл Р. Л.** Эмиттеры с отрицательным электронным сродством: Пер. с англ. М.: Энергия, 1978.
18. **Escher J. S.**//Semiconductors and Semimetals. 1981. Vol. 15. P. 195—300.
19. **Escher J. S., Bell R. L., Gregory P. E. e. a.**// IEEE Trans. Electron Devices. 1980. Vol. ED-27. P. 1244—1259.
20. **Fischer D. G., Enstrom R. E., Escher J. E. e. a.**// J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43, No 9. P. 3815—3823.
21. **Howorth J. R., Folkes J. R., Palmer J. C.**// J. Phys. D. Appl. Phys. 1976. Vol. 9, No 5. P. 785—794.
22. **Бронштейн И. М., Фрайман Б. С.** Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969.
23. **Электронная** и ионная спектроскопия твердых тел/Под ред. Л. Фирменса, Дж. Венника, В. Декейсера: Пер. с англ. М.: Мир, 1981.
24. **Гаванин В. А., Кутенин Ю. Д.**//Итоги науки и техники. Сер. Электроника и ее применение. 1980. Т. 12. С. 43—81.

25. **Martinelli R. U.**//Appl. Phys. Lett. 1970. Vol. 17, No 8. P. 313—314.
26. **Martinelli R. U., Schultz M. L., Gossenberger H. F.**//J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43, No 11. P. 4803—4804.
27. **Елинсон М. И., Васильев Г. Ф.** Автоэлектронная эмиссия. М.: Физматгиз, 1958.
28. **Ненакаливаемые катоды** /Под ред. М. И. Елинсона. М.: Сов. радио, 1974.
29. **Фишер Р., Нойман Х.** Автоэлектронная эмиссня полупроводников: С дополнительным обзором Г. Н. Фурсея и О. И. Львова. М.: Наука, 1971.
30. **Бугаев С. П., Литвинов Е. А., Месяц Г. А., Преображенский Д. И.**//Успехи физ. наук. 1975. Т. 115, № 1, С. 101—120.
31. **Swanson L. W., Crouser L. C.**//Phys. Rev. 1967. Vol. 163, No 2. P. 622—631.
32. **Кульварская Б. С., Кан Х. С., Доценко В. Г.**// Тез. докл. V Всесоюзн. симп. по сильноточной электронике. Томск: Ин-т сильноточной электроники СО АН СССР, 1984. Ч. 1.
33. **Кульварская Б. С.**//Итогн науки и техники. Сер. Электроника. 1981. Т. 13. С. 111—149.
34. **Черепин В. Т.** Ионный зонд. Киев: Наукова думка, 1981.
35. **Baragiola R. A., Alonso E. A., Oliva Florio A.**// Phys. Rev. B. 1979. Vol. 19, No 1. P. 121—129.
36. **Ewing R. I.**//Phys. Rev. 1965. Vol. 139, No 6A. P. 1840—1843.
37. **Photoemission in Solids**//Ed. by M. Cardona, L. Ley: Topics in Applied Physics. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 1978.
38. **Handbook** of Auger electron Spectroscopy/ P. W. Palmberg, G. E. Riach. Weber R. E. Edina: Phys. Electron. Industry, 1975.
39. **Handbook** of X-Ray Photoelectron Spectroscopy/C. D. Wagner, W. M. Riggs, L. E. Davis. Minnesota, USA: Perkin-Elmer Corp., 1979.
40. **Hoene E. L.**//Aev. Electron. Electron. Phys. 1972. Vol. 33A. P. 369—380.
41. **Аршавский А. Н., Голубев Г. П., Кауфман И. Х. и др.**//ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 8. С. 1580—1587.

Глава 26
МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИА- И ПАРАМАГНЕТИКОВ

В. Ю. Иванов, Л. И. Винокурова

Ниже приведены магнитные характеристики веществ, не обладающих (в отсутствие магнитного поля) атомной магнитной структурой: простых элементов, наиболее известных неорганических соединений, а также некоторых важных для практики соединений (силициды, селениды, теллуриды и др.).

В слабых магнитных полях ($\mu_B H \ll \kappa T$, где μ_B — магнетон Бора, H — напряженность магнитного поля, κ — постоянная Больцмана, T — температура) намагниченность J таких веществ возрастает прямо пропорционально напряженности поля: $J=\chi_v H$, где χ_v — магнитная восприимчивость единицы объема.

Вещества с отрицательной магнитной восприимчивостью называют днамагнитными ($\chi_v<0$). Причиной диамагнетизма является электромагнитная индукцня молекулярных токов, вызываемая в электронных оболочках атомов внешним магнитным полем. Явление диамагнетизма присуще всем веществам без исключения.

Парамагнетизм ($\chi_v>0$) характерен для веществ, частицы которых (атомы, молекулы, ионы, атомные ядра) обладают собственными магнитными моментами, но в отсутствие внешнего магнитного поля эти моменты ориентированы хаотически, так что в целом $J=0$. Во внешнем поле магнитные моменты атомов парамагнитных веществ ориентируются преимущественно по полю. Если поле очень велико ($\mu_B H \gg \kappa T$), то все магнитные моменты парамагнитных частиц ориентированы строго по полю (магнитное насыщение).

С повышением температуры вследствие дезорнентирующего действия теплового движения частиц магнитная восприимчивость убывает — в простейшем случае по закону Кюри: $\chi_v=C/T$, где C — постоянная Кюри, $C=\frac{N p_{эф}^2 \mu_B^2}{3k}$. Здесь $p_{эф}$ — эффективный магнитный момент на молекулу; N — число молекул в единице объема.

Для веществ, в которых носители магнитного момента взаимодействуют между собой и с внутрикристаллическим полем, температурная завнсимость магнитной восприимчивости парамагнетиков следует закону Кюри — Вейсса: $\chi_v=C'/(T-\theta)$, где постоянная C' во многих случаях практически совпадает с постоянной C в законе Кюри для свободных магнитных ионов данного вида; постоянная θ характеризует взаимодействие магнитных ионов между собой и с внутрикристаллическим полем. Закон Кюри — Вейсса выполняется обычно в определенной области температур. Прн низких температурах (ниже $T\approx 70$ К) наблюдаются отклонения от него, вызванные влиянием неоднородных электрических полей соседних ионов или ориентированных диполей молекул растворителя на орбитальный момент электронов. Закон Кюри — Вейсса выполняется также для ферро- и антиферромагнетиков в некотором интервале температур выше температуры магнитного упорядочення.

Парамагнитными могут быть и химическне соединения с ионами, не обладающимн магнитным моментом в основном состоянин. В этих соединениях парамагнетизм связан с квантовомеханическнми поправками, обусловленными примесью возбужденных состояний с магнитным моментом. Такой парамагнетизм (поляризационный или парамагнетизм Ван Флека) не зависит от температуры.

В металлах вклад в парамагнитную восприимчивость, обусловленный спиновым парамагнетизмом

электронов проводимости (парамагнетизм Паули), почти не зависит от температуры.

Парамагнитная восприимчивость полупроводников, обусловленная примесными носителями, в простейшем случае зависит от температуры экспоненциально: $\chi_v = AT^{1/2} \exp(-\Delta\varepsilon/(2kT))$, где A — константа вещества; $\Delta\varepsilon$ — ширина запрещенной зоны полупроводника.

Для характеристики магнитных свойств веществ обычно используют удельную магнитную восприимчивость (т. е. магнитную восприимчивость на единицу массы): $\chi = \chi_v/\rho$, где ρ — плотность вещества. Часто магнитную восприимчивость относят к одному молю вещества (χ_m). Между величинами χ и χ_m существует следующее соотношение: $\chi_m = \chi M$, здесь M — относительная молекулярная масса.

В табл. 26.1 приведены значения удельной магнитной восприимчивости диа-и парамагнитных веществ, для которых температурная зависимость восприимчивости не описывается законом Кюри — Вейсса.

В табл. 26.2 приведены значения восприимчивости в основном при комнатной температуре некоторых парамагнетиков, температурная зависимость восприимчивости которых удовлетворяет закону Кюри — Вейсса. Сделана попытка ограничиться лишь теми веществами, в которых не обнаружено магнитное упорядочение при низких температурах (по крайней мере выше 4,2 К).

Значения χ в таблицах даны в СИ ($м^3/кг$). Для пересчета в СГСМ ($см^3/г$) нужно значение χ, выраженное в СИ, умножить на 10^3.

В таблицах при отсутствии дополнительных обозначений приведены данные для твердого поликристаллического состояния. В других случаях приняты сокращения: (м/к) — монокристаллическое состояние (в случае, когда для вещества приведены данные для монокристаллического и поликристаллического состояний, во избежание ошибок специально выделено значение поликристаллического состояния — (п/к); $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ — восприимчивости, измеренные вдоль и перпендикулярно оси наиболее высокой симметрии; χ_a, χ_b, χ_c — восприимчивости вдоль направлений векторов трансляций элементарной ячейки данной кристаллической решетки; (г) — газообразное, (ж) — жидкое, (тв) — твердое состояние; (р) — раствор; p — концентрация дырок в полупроводнике; n — концентрация электронов в полупроводнике; $T_{пл}$ — температура плавления; $T_{исп}$ — температура испарения; ΔT — интервал температур, в котором температурная зависимость χ следует закону Кюри — Вейсса, прочерк в таблицах означает, что значение температуры измерения в оригинальной работе не приведено.

Детальные сведения о явлениях диамагнетизма и парамагнетизма веществ можно найти в следующих монографиях: Я. Г. Дорфман «Магнитные свойства и строение веществ», М., 1955; Ч. Киттель «Введение в физику твердого тела», пер. с англ., М., 1978; С. В. Вонсовский «Магнетизм», М., 1971. Некоторые физические свойства элементов, в том числе и кристаллические структуры, приведены в монографии В. И. Чечерникова «Магнитные измерения», Изд-во МГУ, 1969.

Таблица 26. 1. Значения магнитной восприимчивости диа-и парамагнитных веществ

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} $м^3/кг$	Литература
H_2	—	—1,974	[1]
H_2	293	—1,9867	[2]
H_2	90	—1,97	[2]
H_2	<20	—2,7 (ж)	[3]
H_3AsO_3	293	—0,406 (тв)	[4]
H_3BO_3	298	—0,55	[1]
HBr	273	—0,407 (ж)	[5]
HCl	273	—0,62 (ж)	[1]
HF	287	—0,43 (ж)	[1]
HI	281	—0,373 (ж)	[1]
HI	195	—0,370	[1]
HIO_3	298	—0,27	[1]
HIO_4	298	—0,294	[1]
HNO_3	298	—0,316	[1]
H_2O*1	273	—0,7019 (тв)	[1]
H_2O*1	273	—0,7177 (ж)	[1]
H_2O*1	293	—0,7199 (ж)	[1]
H_2O*1	373	—0,72454 (ж)	[1]
H_2O*1	>373	—0,727 (г)	[1]
H_2O_2	298	—0,015	[1]
H_3PO_3	298	—0,518 (р)	[1]
H_3PO_4	298	—0,447 (р)	[1]
H_2S	298	—0,748	[1]
H_2SO_4	298	—0,406	[1]
H_2SeO_3	298	—0,352 (тв)	[1]
H_2SeO_4	298	—0,353	[1]
H_2TeO_3	288	—0,24	[7]
H_2TeO_4	291	—0,43	[7]
D_2	—	—0,994 (г)	[8]
DH	—	—1,325 (г)	[8]
DHO	302	—0,682 (ж)	[1]
D_2O	276,8	—0,626 (тв)	[1]
D_2O	276,8	—0,632 (ж)	[1]
D_2O	293	—0,637 (ж)	[1]
He	298	—0,47	[1]
Li*2	298	2,04	[10]
Li*2	298	3,35	[9]
LiBr	298	—0,400	[1]
$LiBrO_3$	298	—0,289	[1]
Li $(C_2H_3O_2)$	298	—0,513	[1]
Li_2CO_3	298	—0,365	[1]
LiCl	298	—0,573	[1]
$LiClO_3$	298	—0,319 (р)	[1]
LiF	298	—0,389	[1]
LiH	298	—0,79	[1]
LiI	298	—0,37	[1]
$LiIO_3$	298	—0,26	[1]
$LiNO_3$	292	—0,48	[7]
$LiNO_3 \cdot 3H_2O$	298	—0,504	[1]
Li_2O	293	—0,57	[7]
LiOH	298	—0,516	[1]
Li_2SO_4	298	—0,364	[1]
$Li_2SO_4 \cdot H_2O$	290	—0,43	[7]
Be*3 (м/к) $\chi_{\parallel}$	293	—2,38	[11]
Be*3 (м/к) $\chi_{\perp}$	293	—0,80	[11]
Be (п/к)	103	—0,75	[12]
Be	291	—1,0	[1; 12]

*1 Температурный коэффициент $T/\chi \cdot d\chi/dT$ уменьшается от $2{,}9 \times 10^{-4}$ при 278 К до $0{,}62 \cdot 10^{-4}$ при 343 К [6].

*2 При уменьшении температуры от 298 К до 78 К χ увеличивается на 1,3% [9].

*3 См. рис. 26.1.

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
Be	573	—1,2	[12]
Be	1200	—1,3	[12]
$BeCl_2$	298	—0,332	[1]
$Be(NO_3)_2$	298	—0,308 (р)	[1]
$Be(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	298	—0,311	[4]
BeO*1	298	—0,476	[1]
$Be(OH)_2$	290	—0,537	[1]
$BeSO_4$	298	—0,354	[1]
$BeSO_4 \cdot 4H_2O$	290	—0,51	[7]
B*2	90	—0,63	[13]
B*2	293	—0,62	[1; 13]
B*2	373	—0,73	[14]
B*2	503	—0,76	[14]
B*2	1373	—0,71	[14]
α-B (ромбоэдрический)	300	—0,795	[15]
β-B (ромбоэдрический)	300	—0,78 (0,10)	[16]
B (аморфный)	300	—0,3	[15]
B (аморфный)	300	—0,645	[16]
BCl_3	298	—0,511 (ж)	[1]
B_2O_3	298	—0,56	[1]
C (алмаз)	103	—0,49	[12]
C (алмаз)	293	—0,49	[1]
C (алмаз)	300	—0,98	[17]
C (алмаз)	473	—0,50	[14]
C (алмаз)	673	—0,51	[14]
C (алмаз)	1173	—0,54	[14]
C (алмаз)	1473	—0,56	[14]
C (графит) (п/к)	14	—4,7	[18]
C (графит) (п/к)	289	—3,0	[18]
C (м/к), $\chi_{\parallel}^{*3}$	293	—21	[19]
C (м/к), $\chi_{\perp}^{*3}$	293	—0,4	[19]
CCl_4	291	—0,442	[4]
CH_2	293	—0,4936	[20]
CN_2	298	—0,432 (ж)	[21]
CNCl	298	—0,527	[1]
CO_2	298	—0,454	[1]
CO	298	—0,35	[1]
COS	298	—0,539	[1]
$COCl_2$	298	—0,485	[1]
CS_2	293	—0,554 (ж)	[22]
N_2	88	—0,507	[23]
N_2	293	—0,427	[1]
NH_3	298	—1,06 (г)	[1]
NH_4Br	298	—0,484 (тв)	[1]
$NH_4C_2H_3O_2$	298	—0,533	[1]
$(NH_4)_2CO_3$	298	—0,545	[1]
NH_4Cl	298	—0,686 (тв)	[1]
NH_4ClO_3	298	—0,415	[1]
NH_4F	298	—0,62 (тв)	[1]
NH_4I	298	—0,455 (тв)	[1]
NH_4IO_3	298	—0,323	[1]
NH_4NO_3	298	—0,421 (тв)	[1]
NH_2OH	298	—0,90	[1]
$(NH_4)_2SO_4$	298	—0,51	[1]
$(NH_4)_2S_2O_8$	294	—0,440	[4]
NH_4SCN	298	—0,632	[1]
NO	63—90	0,66 (тв)	[1]
NO	117,64	3,81 (ж)	[1]
NO	146,9	77,45 (г)	[1]
NO	298	48,7 (г)	[1]

*1 Значение χ не зависит от температуры. *2 См. рис. 26.2.
*3 См. рис. 26.3.

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
NO_2	408	3,26 (г)	[1]
N_2O	285	—0,429 (ж)	[1]
N_2O	289	—0,429 (г)	[1]
N_2O_3	291	—0,206 (ж)	[1]
N_2O_4	257	—0,276 (тв)	[1]
N_2O_4	295.1	—0,250	[1]
N_2O_5	289	—0,332 (тв)	[1]
β-O_2	33	118 (тв)	24
γ-O_2	54,3	319 (тв)	[1]
O_2	54,3	310 (ж)	[1]
O_2	70,8	271,4 (ж)	[1]
O_2	90,1	240,6 (ж)	[1]
O_2	293	107,8 (г)	[1]
O_3	90	0,14*1 (ж)	[1]
O_3	90	0,14 (г)	[25]
Ne	293	—0,33 (г)	[1]
Na*2	78	0,582	[9]
Na*2	298	0,610	[9]
Na*2	303	0,600	[26]
Na*2	523	0,620	[26]
$Na_2B_4O_7$	298	—0,422	[1]
$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	293	—0,593	[27]
NaBr	298	—0,40	[1]
$NaBr \cdot 2H_2O$	291	—0,420 (р)	[4]
$NaBrO_3$	298	—0,293	[1]
$NaC_2H_3O_2$	298	—0,458	[1]
$NaC_2H_3O_2 \cdot 3H_2O$	282	—0,483	[4]
Na_2CO_3	298	—0,39	[1]
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	290	—0,58	[7]
NaCl	123	—0,501 (тв)	[28]
NaCl	298	—0,518 (тв)	[1]
NaCl	635	—0,499	[28]
NaCl	1206	—0,508	[28]
$NaClO_3$	298	—0,326	[1]
$Na_2Cr_2O_7$	298	—0,21	[1]
NaF	298	—0,383 (тв)	[1]
$NaHCO_3$	293	—0,21	[29]
$NaHPO_3$	293	—0,457	[30]
$NaHPO_4$	293	—0,399	[30]
$NaHPO_4 \cdot H_2O$	296	—0,438 (тв)	[4]
NaH_2PO_2	293	—0,381	[30]
NaI	298	—0,380	[1]
$NaI \cdot 2H_2O$	300	—0,405 (р)	[4]
$NaIO_3$	298	—0,268	[1]
$NaNO_2$	298	—0,210	[1]
$NaNO_3$	298	—0,301	[1]
Na_2O	298	—0,319	[1]
Na_2O_2	298	—0,36	[1]
NaOH	290	—0,59	[7]
$NaPO_3$	298	—0,417	[1]
Na_2S	298	—0,50	[1]
Na_2S_2	298	—0,48	[1]
Na_2S_3	298	—0,48	[1]
Na_2S_4	298	—0,48	[1]
Na_2S_5	298	—0,48	[1]
Na_2SO_4	298	—0,37	[1]
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	298	—0,571	[1]
$Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$	293	—0,462	[30]
$Na_2S_2O_3$	298	—0,246	[1]
$Na_2S_2O_3 \cdot 3H_2O$	290	—0,368 (тв)	[4]
$Na_2S_2O_4$	298	—0,200	[10]
Na_2Se	298	—0,48	[31]

*1 При $T < 90$ К значение χ не зависит от T [1].
*2 См. рис. 26.4, 26.5.

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9}, м³/кг	Литература
Na_2Se_2	298	—0,392	[31]
Na_2Te	298	—0,432	[31]
Na_2Te_2	298	—0,349	[31]
Mg*1 (п/к)	1,2	0,25	[32]
Mg*1 (п/к)	293	0,46	[33]
Mg (м/к), $\chi_{\parallel}$	293	0,46	[33]
Mg (м/к), $\chi_{\perp}$	298	—0,39	[1]
$MgBr_2$	298	—0,541	[1]
$Mg(C_2H_3O_2)_2 \cdot 4H_2O$	298	—0,384	[1]
$MgCO_3$	293	—0,525	[1]
$MgCO_3 \cdot 3H_2O$	298	—0,498	[1]
$MgCl_2$	291	—0,57	[7]
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	298	—0,364	[1]
MgF_2	298	—0,399	[1]
MgI_2	291	—0,287 (р)	[4]
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	290	—0,25	[1]
MgO_2	288	—0,378	[1]
$Mg(OH)_2$	298	—0,415	[1]
$MgSO_4$	298	—0,441	[1]
$MgSO_4 \cdot H_2O$	298	—0,518	[1]
$MgSO_4 \cdot 5H_2O$	298	—0,551	[1]
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	298	—0,499	[1]
$Mg_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	298	0,61	[1]
Al*2	$T > T_{пл}$	0,44 (ж)	[1]
Al*2	292	—0,32	[7]
$AlBr_3$	292	—0,60	[7]
$AlCl_3$	302	—0,16	[1]
AlF_3	298	—0,36	[1]
Al_2O_3*3	293	—0,337	[34]
$Al_2O_3 \cdot 2H_2O$	298	—0,27	[1]
$Al_2(SO_4)_3$	300	—0,228	[17]
Si*4	298	—0,370	[1]
$SiBr_4$	300	—0,265	[35]
SiC	298	—0,520	[1]
$SiCl_4$	293	—0,493	[1]
SiO_2	293	—0,443	[1]
$Si(OH)_4$	293	—0,427	[36]
$SiO(OH)_2$	293	—0,429	[36]
$Si_2O(OH)_6$	293	—0,86	[1]
P (черный)	103	—0,90	[2]
P (белый)	317	—0,90	[2]
P (белый)	293	—0,67	[14]
P (красный)	318	—0,90 (ж)	[14]
P	393	—0,90 (ж)	[14]
P	292	—0,463	[1]
PCl_3	298	—0,490	[1]
PCl_5	291	—0,46	[7]
P_2O_5	286	—0,449	[4]
$POCl_3$	293	—0,487	[1]
α-S (ромбическая)	293	—0,464	[1]
β-S (моноклинная)	293	0,259÷0,374	[37]
S*5	$T > T_{пл}$	—0,480 (ж)	[1]
S	828	22 (г)	[1]

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
S	1023	14,5 (г)	[1]
S (м/к), χ_a	298	—0,500	[38]
S (м/к), χ_b	298	—0,478	[38]
S (м/к), χ_c	298	—0,474	[38]
S_2C	298	—0,554 (ж)	[10]
SCl_2	298	—0,480	[1]
SCl_3	298	—0,357	[1]
S_2Cl_3	298	—0,365	[1]
SF_6	293	—0,301	[1]
SH_2	298	—0,748	[10]
SI	298	—0,332	[1]
SI_2	298	—0,184	[10]
S_3N_4	298	—0,553	[10]
SO_2	298	—0,284	[1]
$SOCl_2$	298	—0,378	[10]
SO_2Cl_2	283	—0,402	[10]
SOC	298	—0,539	[10]
Cl	213	—0,57 (ж)	[20]
Cl	298	—0,57	[1]
ClF_3	298	—0,287	[1]
ClH	195	—0,647	[10]
ClH	273	—0,620 (ж)	[10]
Ar	90	—0,49	[2]
Ar	293	—0,49	[1]
K*1	293	0,532	[1]
K*1	303	0,460	[26]
K*1	523	0,467 (ж)	[26]
KBr	298	—0,413	[1]
$KBrO_3$	298	—0,315	[1]
$KC_2H_3O_2$	298	—0,458	[1]
KCN	298	—0,568	[1]
KCNO	293	—0,465	[39]
K_2CO_3	298	—0,427	[1]
KCl	298	—0,523	[1]
$KClO_3$	298	—0,349	[1]
$KClO_4$	298	—0,342	[10]
K_2CrO_4	298	—0,020	[1]
$K_2Cr_2O_7$	293	—0,100	[1]
KF	298	—0,406	[1]
$K_4Fe(CN)_6$	298	—0,353	[1]
KHF_2	293	—0,428	[40]
KH_2PO_4	290	—0,435	[4]
$KHSO_4$	298	—0,36	[1]
KI	298	—0,384	[1]
KIO_3	298	—0,295	[1]
KIO_4	295	—0,292	[4]
$KMnO_4$	298	—0,127	[1]
KNO_3	293	—0,333	[1]
KNO_2	298	—0,274	[1]
KOH	298,5	—0,390	[1]
K_2S	298	—0,54	[1]
K_2S_2	298	—0,50	[1]
K_2S_3	298	—0,46	[1]
K_2S_4	298	—0,43	[1]
K_2S_5	298	—0,41	[1]
KSCN	298	—0,49	[1]
K_2SO_3	298	—0,404	[1]
K_2SO_4	289	—0,385	[1]
$K_2S_2O_3$	299	—0,393	[4]
$K_2S_2O_5$	295	—0,389	[4]
$K_2S_4O_6$	293	—0,412	[30]

*1 См. рис. 26.6.
*2 См. рис. 26.7.
*3 χ зависит от способа получения вещества [10].
*4 Зависимость χ от концентрации электронов и дырок см. в [98].
*5 Значение χ зависит от способа изготовления и термообработки вещества [37].

*1 См. рис. 26.4, 26.5; при уменьшении температуры от 298 К до 78 К χ уменьшается на 0,2% [26].

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
$K_2S_2O_7$	295	—0,398	[4]
$K_2S_2O_8$	293	—0,371	[30]
K_2SiO_3	299	—0,383 (р)	[4]
Ca*1 (п/к)	291	1,1	[12]
Ca*2 (м/к)	293	1,05	[33]
$CaBr_2$	298	—0,369	[1]
$CaBr_2 \cdot 3H_2O$	298	—0,453	[1]
$Ca(BrO_3)_2$	298	—0,287	[1]
$Ca(C_2H_3O_2)_2$	283	—0,446	[1]
$CaCO_3$	298	—0,382	[1]
$CaCl_2$	290	—0,49	[1]
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	288	—0,462	[4]
CaF_2	293	—0,360	[1]
CaI_2	298	—0,371	[1]
$Ca(IO_3)_2$	298	—0,260	[1]
$Ca(NO_3)_2$	298	—0,239 (р)	[10]
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	298	—0,194	[1]
CaO	289	—0,27	[1]
CaO_2	298	—0,330	[1]
$Ca(OH)_2$	298	—0,297	[1]
$CaSO_4$	293	—0,364	[1]
$CaSO_4 \cdot (1/2)\,H_2O$	298	—0,384	[10]
$CaSO_4 \cdot H_2O$	293	—0,384	[30]
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	298	—0,43	[1]
Sc*3	90	8,2	[1]
Sc*3	292	7,0	[41]
Sc*3	293	6,45 (0,05)	[42]
$Sc_2(C_2O_4)_3$	293	—0,25	[29]
$ScH_{0,16}$	293	6,38	[42]
$ScH_{0,26}$	293	6,20	[42]
$ScH_{0,36}$	293	3,61	[42]
Sc_2O_3	293	—0,018	[29]
$Sc_2(SO_4)_3$	293	—0,33	[43]
Ti*4 (п/к)	90	3,13	[1]
Ti*4 (п/к)	293	3,19	[1]
Ti*4 (п/к)	293	3,36	[44]
Ti (м/к), $\chi_{\parallel}$	298	3,35	[45]
Ti (м/к), $\chi_{\parallel}$	573	3,65	[45]
Ti (м/к), $\chi_{\perp}$	298	3,07	[45]
Ti (м/к), $\chi_{\perp}$	573	3,38	[45]
TiC*5	293	0,6	[46]
$TiCl_4$	293	—0,213	[47]
TiI_2	288	5,93	[1]
TiN*5	293	1,00	[48]
TiO*6	79	1,38	[49]
TiO_2	293	0,08	[50]
Ti_3O_5	293	8,1	[51]
TiO_3	248	1,38	[1]
TiP	297	0,25	[52]
TiS	298	5,40	[1]
Ti_2S_3	293	0,91	[51]
TiS_2	296	0,408	[53]
TiS_3	90—573	—0,09	[54]
TiSi	293	0,20	[55]
$TiSi_2$	293	1,2	[55]
Ti_5Si_3	293	2,54	[56]

*1 См. рис. 26.6. *2 χ изотропна.
*3 См. рис. 26.8.
*4 См. рис. 26.9.
*5 χ почти не зависит от T [48].
*6 χ не зависит от T между 79 и 373 К [49].

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
V*1	293	5,30	[57]
VCl_4NO	298	5,0	[58]
V_2Cl_7NO	298,5	10,504	[59]
$V_3Cl_8(NO)_5$	298,5	10,998	[59]
V_2O_5*2	293	1,1	[60]
$VOCl_3$	293	—0,069	[61]
VP	297	0,032	[52]
V_3Si	293	4,4	[62]
V_5Si_3	293	3,0	[63]
VSi_2	293	1,50	[56]
VSi_2	293	1,32	[64]
$Cr(CO)_6$	298	0,050	[1]
$Cr(C_6H_6)_2$	298	—0,724	[1]
CrO_3	293	0,40	[65]
CrO_2Cl	220,4	—0,094	[66]
CrO_2Cl	249,3	—0,040	[66]
CrO_2Cl	296,2	0,017	[66]
CrP	298	3,80	[67]
Cr_3P	4,2	4,0	[68]
Cr_3Si	293	2,1	[70]
Cr_3Si	293	2,3	[69]
Cr_5Si_3	293	3,0	[69]
Cr_5Si_3	293	3,06	[63]
CrSi	293	5,1	[69]
$CrSi_2$	293	—0,38÷—0,94	[71]
Mn_nSi_{2n-m}*3	293	—0,4	[72]
$FeAs_2$	90—670	2,1834	[73]
FeB_2 (порошок)	100—300	0,74	[74]
FeB_2 (м/к)	115—300	—0,138	[74]
$Fe(CN)_6H_4$	298	—0,329	[1]
$Fe(CO)_4$	298	—0,019	[1]
$Fe(CO)_5$	298	—0,480	[1]
FeS_2	295	0,084	[75]
FeSi	293	7,9	[76]
CoP	298	0,6	[67]
Co_2P	298	3,54	[67]
CoPS	298	0,17	[77]
CoPSe	298	0,089	[77]
Co_3S_4	293	3,4	[78]
Co_2Si	293	6,4	[79]
CoSi	293	—0,3	[76]
CoSi	293	—0,44	[80]
$CoSi_2$	293	0,4	[76]
NiAs	298	0,322	[1]
β-$NiAs_2$	90—373	0,2309	[73]
Ni_3P	4,2	8,8	[68]
Ni_3S_2	293	4,3	[81]
Ni_2Si	293	0,3	[79]
NiSi	293	—0,3	[76]
NiSi	293	—0,08	[71]
$Ni_{1,03}Si_{1,93}$	293	0,19	[82]
Cu*4	296	—0,086	[1]
Cu*4	$T > T_{пл}$	—0,097 (ж)	[1]
CuBr	298	—0,345	[1]
CuCN	298	—0,267	[1]
CuCl	298	—0,400	[1]
CuI	298	—0,330	[1]
Cu_2O	298	—0,216	[83]
Cu_3P	298	—0,149	[1]
Cu_3P_2	291	—0,23	[7]

*1 См. рис. 26.10: при $T < 770$ К λ не зависит от T [10].
*2 Значение χ не зависит от T [60].
*3 Значение χ не зависит от T [72].
*4 См. рис. 26.11.

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
CuP_2	298	—0,28	[1]
CuS	293	0,05	[84]
Cu_2S	77—1073	0.30	[84]
CuS_2	300	0,15	[85]
CuSCN	298	—0,398	[1]
CuSe	293	—0,14	[86]
Cu_2Se	77—1073	0.25	[84]
$CuSe_2$	298	0.42	[87]
$CuTe_2$	298	—0,40	[87]
Zn (п/к)	298	—0,175	[1]
Zn (п/к)	$T>T_{пл}$	—0,12 (ж)	[1]
Zn*1 (м/к), $\chi_{\parallel}$	293	—0,190	[88]
Zn*1 (м/к), $\chi_{\perp}$	293	—0,145	[88]
Zn_3As_2	300	—0,434	[89]
$ZnBr_2$	292	—0,40	[7]
$Zn(C_2H_3O_2)_2 \cdot 2H_2O$	298	—0,46	[1]
$Zn(CN)_2$	298	—0,392	[1]
$ZnCO_3$	298	—0,271	[1]
$ZnCl_2$	296	—0,477	[1]
ZnF_2	299,6	—0,370	[1]
ZnI_2	298	—0,307	[1]
$Zn(NO_3)_2$	298	—0,333	[1]
ZnO	298	—0,565	[1]
$Zn(OH)_2$	298	—0,67	[1]
Zn_3P_2	300	—0,465	[89]
ZnS	77	—0,36	[10]
ZnS	298	—0,26	[1]
Zn_3Sb_2	300	—0,466	[89]
$ZnSO_4$	298	—0,34	[10]
$ZnSO_4 \cdot H_2O$	298	—0,351	[1]
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	298	—0,497	[1]
$Zn_3(PO_4)_2$	298	—0,365	[1]
Ga*2 (п/к)	80	—0,35 (тв)	[1]
Ga*2 (п/к)	290	—0,31 [тв)	[1]
Ga*2 (п/к)	303	0,036 (ж)	[1]
Ga (м/к), χ_a	298	—0,12	[90]
Ga (м/к), χ_b	298	—0,42	[90]
Ga (м/к), χ_c	298	—0,23	[90]
GaAs	300	—0,230	[17]
$GaCl_2$	293	—0,45	[1]
CaI_2	298	—0,46	[1]
GaN	293	—0,332	[6]
Ca_2O	298	—0,219	[1]
CaP	300	—0,298	[17]
Ca_2S	298	—0,210	[1]
CaS	295	—1,715	[91]
Ca_2S_3	298	—0,34	[1]
CaSb	293	—0,201	[92]
CaSe	293	—0,20	[93]
Ge*3	4,2	—0,1102	[94]
Ge*3	77,3	—0,1095	[94]
Ge*3	293	—0,1059	[1]
$GeCl_4$	298	—0,34	[1]
GeF_4	298	—0,34	[10]
GeI_4	298	—0,30	[1]
GeO	298	—0,325	[1]
GeO_2	298	—0,328	[1]
GeS	298	—0,391	[1]
GeS_2	298	—0,390	[1]
As (п/к)	84	0,146	[99]
As (п/к)	181	0,092	[99]
As (п/к)	298	0,016	[99]
As (п/к)	461	—0,087	[99]
β-As аморфный	90	—0,30	[1]
β-As аморфный	293	—0,316	[1]
γ-As аморфный	293	—0,307	[1]
As (м/к) $\chi_{\parallel}$ *1	82	1,005	[99]
As (м/к) $\chi_{\parallel}$ *1	292	0,578	[99]
As (м/к) $\chi_{\parallel}$ *1	531	0,273	[99]
As (м/к) $\chi_{\perp}$	82	—0,238	[99]
As (м/к) $\chi_{\perp}$	292	—0,279	[99]
As (м/к) $\chi_{\perp}$	510	—0,302	[99]
$AsBr_3$	298	—0,337	[1]
$AsCl_3$	298	—0,441	[10]
AsI_3	298	—0,312	[1]
As_2O_3	298	—0,208	[10]
AsOCl	298	—0,240	[10]
As_2S_2	298	—0,327	[10]
As_2S_3	291	—0,03	[7]
Se*2 (гексагональный)	298	—0,32	[1]
Se*2 (гексагональный)	1,6—77	0,272	[100]
Se*2 (гексагональный)	293	0,188—0,271	[37]
Se*2	900	—0,304 (ж)	[1]
Se (аморфный)	300	—0,279	[101]
Se_2Br_2	298	—0,356	[1]
Se_2Cl_2	298	—0,414	[1]
SeF_6	298	—0,264	[1]
SeO_2	298	—0,245	[1]
SeO_3H_2	298	—0,352	[10]
SeO_4H_2	298	—0,353	[10]
$SeOCl_2$	298	—0,293	[10]
Br_2	103	—0,40 (тв)	[12]
Br_2	265	—0,40 (тв)	[12]
Br_2	266	—0,40 (ж)	[12]
Br_2	291	—0,40 (ж)	[12]
Br_2	$T>T_{пл}$	—0,353 (ж)	[1]
Br_2	$T>T_{исп}$	—0,46 (г)	[1]
BrF_3	298	—0,248	[1]
BrF_5	298	—0,258	[1]
Kr	291	—0,38 (ж)	[102]
Kr	$T>T_{исп}$	—0,344 (г)	[1]
Rb*3	298	0,21	[9]
Rb*3	303	0,198	[1]
RbBr	298	—0,341	[1]
Rb_2CO_3	298	—0,326	[1]
RbCl	298	—0,380	[1]
RbF	298	—0,305	[1]
RbI	298	—0,340	[1]
$RbNO_3$	293	—0,281	[1]
Rb_2S	298	—0,394	[1]
Rb_2S_2	298	—0,383	[1]
Rb_2S_3	298	—0,374	[10]

*1 См. рис. 26.12.
*2 См. рис. 26.13.
*3 См. рис. 26.14 — 26.16; зависимость χ от концентраций электронов, дырок — см. [95—98].

*1 См. рис. 26.17.
*2 См. рис. 26.18.
*3 См. рис. 26.4; при уменьшении температуры от 298 до 78 К значение χ увеличивается на 2,5% [9].

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
Rb_2S_4	298	—0,371	[10]
Rb_2S_5	298	—0,368	[10]
Rb_2S_6	298	—0,363	[10]
Rb_2SO_3	293	—0,331	[1]
Sr	295	1,05	[1]
Sr	533	0,73	[103]
$SrBr_2$	298	—0,35	[1]
$SrBr_2 \cdot 6H_2O$	298	—0,45	[1]
$Sr(BrO_3)_2$	298	—0,272	[1]
$Sr(C_2H_3O_2)_2$	284	—0,385	[1]
$SrCO_3$	298	—0,32	[1]
$SrCl_2$	293	—0,40	[1]
$SrCl_2 \cdot 6H_2O$	298	—0,544	[1]
$Sr(ClO_3)_2$	298	—0,287	[1]
$SrCrO_4$	298	—0,025	[1]
SrF_2	293	—0,296	[1]
SrI_2	298	—0,328	[1]
$Sr(IO_3)_2$	298	—0,247	[1]
$Sr(NO_3)_2$	298	—0,270	[1]
$Sr(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	298	—0,374	[1]
SrO	298	—0,34	[1]
SrO_2	298	—0,27	[1]
$Sr(OH)_2$	298	—0,33	[1]
$Sr(OH)_2 \cdot 8H_2O$	298	—0,512	[1]
$SrSO_4$	298	—0,315	[1]
Y*1	90	2,43	[1]
Y*1	292	2,15	[1]
Y_2O_3	293	0,197	[1]
Y_2S_3	298	0,365	[1]
Zr*2	90	1,305	[1]
Zr*2	293	1,33	[1]
Zr*2	293	1,38	[57]
$ZrBr_4$	301	—0,261	[104]
ZrC	293	—0,22	[48]
$ZrCl_4$	303	—0,302	[104]
ZrF_4	301	—0,194	[104]
ZrI_4	302	—0,191	[104]
ZrN	293	0,57	[48]
Zr_3N_4	293	—0,03	[105]
$Zr(NO_3)_4 \cdot 5H_2O$	298	—0,179	[1]
ZrO_2	288	—0,112	[1]
ZrP	297	—0,21	[52]
ZrS_3	90—573	—0,19	[54]
$ZrSiO_4$	292	—0,215	[4]
Nb*3	14	2,34	[11]
Nb*3	289	2,28	[11]
Nb*3	293	2,34	[57]
$NbH_{0,86}$	81	0,62	[106]
$NbH_{0,86}$	291	0,70	[106]
NbF_4	297	0,580	[107]
NbO_2	295	0,05	[50]
Nb_2O_5	295	0,09	[108]
NbP	297	—0,52	[52]
Mo*4	20,4	1,56	[1]
Mo*4	63.8	1,13	[1]
Mo*4	298	0,93	[1]
Mo*4	293	0,82	[44]
Mo_6Br_6	290,5	—0,06	[1]
$Mo(CO)_6$	293	—0,28	[109]
MoF_6	293	—0,12	[1]

*1 См. рис. 26.8.
*2 См. рис. 26.10, 26.19.
*3 См. рис. 26.10.
*4 См. рис. 26.20.

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
MoO_2	289	0,32	[1]
MoO_3	293	0,02	[1]
Mo_2C_3	298	—0,175	[1]
Mo_2O_5	293	0,23	[110]
Mo_3O_8	298	0,101	[1]
MoS_2	289	—0,48	[10]
MoS_3	289	—0,33	[1]
$MoTe_2$	293	—0,342	[111]
Tc	78	2,9	[1]
Tc	298	2,7	[1]
Tc	402	2,5	[1]
$TcO_2 \cdot 2H_2O$	78	3,4	[112]
$TcO_2 \cdot 2H_2O$	300	1,2	[1]
$TcO_2 \cdot 2H_2O$	398	1,34	[112]
Tc_2O_7	298	—0,129	[1]
$TcO_4(NH_4)$	78	0,077	[10]
$TcO_4(NH_4)$	298	0,050	[10]
Ru*1	18	0,43	[12]
Ru*1	293	0,34	[44]
Ru*1	723	0,496	[1]
$RuAs_2$	90—770	—0,1681	[73]
RuO_2	297	1,26	[113]
$RuOCl_6$	299	0,74	[114]
RuP_2	90—765	—0,2849	[73]
Rh*2	20	0,926	[115]
Rh*2	293	1,03	[44]
Rh*2	723	1,195	[1]
$RhCl_3$	298	—0,036	[1]
RhF_4	293	2,79	[1]
Rh_2O_3	298	0,408	[1]
$Rh_2(SO_4)_3 \cdot 6H_2O$	298	—0,173	[1]
$Rh_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$	298	—0,200	[1]
Pd*3	20	7,32	[115]
Pd*3	288	5,333	[1]
Pd*3	1503	1,7	[14]
$PdCl_2$	291,5	—0,214	[1]
$PdCl_2$	300	0,255	[116]
Ag*4	14	—0,19	[18]
Ag*4	293	—0,181	[1]
Ag*4	975	—0,1786	[117]
Ag*4	$T > T_{пл}$	—0,22 (ж)	[10]
AgBr	283	—0,318	[1]
$AgC_2H_3O_2$	298	—0,362	[1]
AgCN	299	—0,322	[1]
Ag_2CO_3	298	—0,292	[1]
AgCl	290	—0,34	[1]
$AgCrO_4$	298	—0,179	[1]
Ag_2F	297—350	—0,274	[10]
AgF	298	—0,288	[1]
AgI	298	—0,34	[1]
$AgNO_2$	298	—0,273	[1]
$AgNO_3$	298	—0,269	[1]
Ag_2O	298	—0,578	[1]
AgO	287	—0,158	[1]
AgP_2	298	—0,318	[10]
AgP_3	298	—0,329	[10]
Ag_3PO_4	298	—0,287	[1]
Ag_2S (ромбическая)	77—1073	0,32	[84]
AgSCN	298	—0,3726	[1]
$AgSO_4$	299	—0,292	[4]

*1 См. рис. 26.21.
*2 См. рис. 26.22.
*3 См. рис. 26.23.
*4 См. рис. 26.24.

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
Ag_2SO_4	298	—0,298	[1]
Ag_2Se	77—1073	0,35	[84]
Cd*1 (п/к)	14	—0,310	[10]
Cd*1 (п/к)	293	—0,176 (тв)	[1]
Cd*1 (п/к)	$T>T_{пл}$	—0,160 (ж)	[1]
Cd (м/к), $\chi_{\parallel}$	14	0,679	[118]
Cd (м/к), $\chi_{\parallel}$	293	—0,243	[118]
Cd (м/к), $\chi_{\perp}$	14	—0,130	[118]
Cd (м/к), $\chi_{\perp}$	293	—0,142	[118]
Cd_3As_2	300	—0,431	[89]
$CdBr_2$	298	—0,321	[1]
$CdBr_2 \cdot 4H_2O$	298	—0,407	[1]
$Cd(C_2H_3O_2)_2$	298	—0,379	[1]
$Cd(C_2H_3O_2)_2 \cdot 3H_2O$	291	—0,365	[4]
$Cd(CN)_2$	298	—0,328	[1]
$CdCO_2$	288	—0,305	[4]
$CdCO_3$	298	—0,271	[1]
$CdCl_2$	298	—0,375	[1]
$CdCl_2 \cdot H_2O$	285	—0,368	[4]
$CdCl_2 \cdot 2H_2O$	298	0,451	[1]
$CdCrO_4$	298	—0,074	[1]
CdF_2	298	—0,270	[1]
CdI_2	298	—0,320	[1]
$Cd(IO_3)_2$	298	—0,235	[1]
$Cd(NO_3)_2$	298	—0,233	[1]
$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	298	—0,454	[1]
CdO	300	—0,380	[119]
CdO	300—900	—0,278	[120]
$Cd(OH)_2$	298	—0,28	[1]
Cd_3P_2	300	—0,338	[89]
$Cd_3(PO_4)_2$	298	—0,302	[1]
CdS	298	—0,436	[121]
$CdSO_4$	298	—0,284	[1]
$3CdSO_4 \cdot 8H_2O$	286	—0,281	[4]
CdSb	293	—0,30	[122]
Cd_3Sb_2	300	—0,434	[89]
CdSe (м/к), $\chi_{\parallel}$	298	—0,354	[123]
CdSe (м/к), $\chi_{\perp}$	298	—0,304	[123]
CdP_2*2	—	—0,415	[124]
Cd_3P_2	300	—0,16	[125]
In*3 (п/к)	293	—0,077	[126]
In*3 (п/к)	298	—0,56	[1]
In (м/к), $\chi_{\parallel}$	293	—0,158	[127]
In (м/к), $\chi_{\perp}$	293	—0,078	[127]
InAs	293	—0,2714	[128]
$InBr_3$	298	—0,30	[1]
InCl	298	—0,20	[1]
$InCl_2$	298	—0,30	[1]
$InCl_3$	298	—0,57	[1]
InF_3	298	—0,40	[1]
InN*4	293	—0,320	[129]
In_2O	298	—0,191	[1]
In_2O_3	298	—0,076	[1]
InP*5	293	—0,313	[130]
$InP_{0,2}As_{0,8}$	293	—0,282	[130]
In_2S	298	—0,19	[1]

*1 См. рис. 26.25.
*2 Восприимчивость решетки.
*3 См. рис. 26.26.
*4 Решеточная часть χ.
*5 $n = 1{,}9 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$.

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
InS	298	—0,19	[1]
In_2S_3	298	—0,30	[1]
InS_3	293	—0,19	[7]
InSb*1	293	—0,281	[130]
InSb*2	293	—0,284	[131]
InTe кубическое	293	—0,14	[132]
InTe тетрагонное	293	—0,22	[132]
α-Sn (серое)	273*3	—0,310	[130]
α-Sn (серое)	273*4	—0,265	[130]
α-Sn (серое)	100	—0,267	[1]
β-Sn (белое)*5 (п/к)	4,2	0,023	[94]
β-Sn (белое)*5 (п/к)	293	0,026	[1; 94]
β-Sn (м/к), $\chi_{\parallel}$	293	0,026	[127]
β-Sn (м/к), $\chi_{\perp}$	293	0,029	[127]
Sn	$T>T_{пл}$	—0,038 (ж)	[1]
$SnBr_4$	298	—0,340	[1]
$Sn(CH_3)_4$	293	—0,738	[10]
$Sn(C_2H_5)_4$	293	—0,144	[10]
$Sn(C_4H_9)_4$	293	—0,669	[10]
$SnCl_2$	298	—0,36	[1]
$SnCl_4$	298	—0,441 (ж)	[1]
$SnCl_2 \cdot 2H_2O$	298	—0,405	[1]
SnI_4	298	0,327	[10]
SnO	298	—0,14	[1]
SnO_2	298	—0,27	[1]
Sn_2O_3	289	—0,33	[7]
$Sn(OH)_4$	293	—0,321	[1]
$SnO(OH)_2$	293	—0,278	[30]
$SnSO_4$	291	—0,29	[30]
SnSe	293	—0,10	[93]
Sb*6 (п/к)	293	—0,81 (тв)	[1]
Sb*6 (п/к)	$T>T_{пл}$	—0,02 (ж)	[1]
Sb (м/к), $\chi_{\parallel}$	90	—1,73	[133]
Sb (м/к), $\chi_{\parallel}$	293	—1,42	[133]
Sb (м/к), $\chi_{\perp}$	90	—0,50	[133]
Sb (м/к), $\chi_{\perp}$	293	—0,50	[133]
$SbBr_3$	298	—0,318	[1]
$Sb(C_6H_5)_3$	298	—0,515	[10]
SbCd	293	—0,213	[134]
$SbCl_3$	298	—0,380	[1]
$SbCl_5$	298	—0,401 (ж)	[1]
SbF_3	298	—0,256	[1]
SbI_3	298	—0,293	[1]
Sb_2O_3	298	—0,238	[1]
SbOCl	298	—0,214	[10]
Sb_2S_3	298	—0,25	[1]
Sb_2Se_3*7	130—500	—0,383	[135]
Sb_2Te_3	130—150	—0,398	[135]
SbZn	293	—0,285	[134]
$SbZn_3$	293	—0,261	[134]
$SbZn_3$	$T>T_{пл}$	—0,107 (ж)	[134]
Te*8	14,2	—0,293	[136]
Te*8	293	—0,283 (0,005)	[37]
Te*8	$T>T_{пл}$	—0,05 (ж)	[1]

*1 $n = 6{,}2 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$.
*2 $n = 4 \cdot 10^{14}$ см$^{-3}$.
*3 $n = 10^{17}$ см$^{-3}$.
*4 Решеточная часть.
*5 См. рис. 26 27.
*6 См. рис. 26 28.
*7 p-Проводимость.
*8 См. рис. 26.29.

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
Te*1 (м/к), $\chi_{\parallel}$	293	—0,329	[10]
Te*1, $\chi_{\perp}$	293	—0,296	[10]
$TeBr_2$	298	—0,369	[1]
$TeCl_2$	298	—0,474	[1]
TeF_6	298	—0,273	[1]
TeO_2	291	—0,14	[7]
TeO_2H_2	298	—0,216	[10]
$Te(CH_2)_2Cl_2$	298	—0,402	[10]
$Te(CH_3)_2I_2$	298	—0,353	[10]
I_2	14	—0,313 (тв)	[136]
I_2	298	—0,35 (тв)	[1]
I_2	368	—0,38 (тв)	[14]
I_2	386	—0,39 (ж)	[14]
I_2	433	—0,33 (ж)	[14]
I_1 (атомарный)	1303	6,85 (г)	[1]
I_1 (атомарный)	1440	8,82 (г)	[1]
I_2 (м/к), χ_a	298	—0,354	[137]
I_2 (м/к), χ_b	298	—0,331	[137]
I_2 (м/к), χ_c	298	—0,336	[137]
ICl	285	—0,336 (ж)	[1]
ICl_2	288	—0,387 (р)	[4]
ICl_3	298	—0,387	[1]
IF_5	298	—0,262	[1]
IH	195	—0,369 (тв)	[10]
IH	281	—0,373 (тв)	[10]
Xe	298	—0,33	[1]
Cs*2	298	0,23	[9]
Cs*2	$T > T_{пл}$	0,20 (ж)	[1]
CsBr	298	—0,316	[1]
$CsBrO_3$	298	—0,288	[1]
Cs_2CO_3	298	—0,318	[1]
CsCl	298	—0,337 (тв)	[1]
$CsClO_3$	298	—0,30	[1]
CsF	298	—0,293	[1]
CsI	298	—0,318	[1]
$CsIO_3$	298	—0,270	[1]
$CsNO_3$	298	—0,279	[10]
Cs_2S	298	—0,349	[1]
Cs_2S_2	298	—0,355	[10]
Cs_2S_3	298	—0,354	[10]
Cs_2S_4	298	—0,353	[10]
Cs_2S_5	298	—0,352	[10]
Cs_2S_6	298	—0,349	[10]
Cs_2SO_4	298	—0,321	[1]
Cs_2Se	298	—0,331	[10]
Ba	293	0,150	[1]
Ba	573	0,316	[138]
Ba	673	0,415	[138]
$BaBr_2$	298	—0,31	[1]
$BaBr_2 \cdot 2H_2O$	298	—0,357	[1]
$Ba(BrO_3)_2$	298	—0,269	[1]
$Ba(C_2H_3O_2)_2 H_2O$	298	—0,366	[1]
$BaCO_3$	298	—0,298	[1]
$BaCl_2$	298	—0,35	[1]
$BaCl_2 \cdot 2H_2O$	298	—0,409	[1]
$Ba(ClO_3)_2$	298	—0,288	[1]
BaF_2	298	—0,291	[1]
BaI_2	298	—0,317	[1]
$BaI_2 \cdot 2H_2O$	298	—0,38	[1]
$Ba(IO_3)_2$	298	—0,251	[1]

*1 При повышении температуры $\chi_{\parallel}$ уменьшается, а $\chi_{\perp}$ почти постоянна; при $T = 493$ К $\chi_{\parallel} = \chi_{\perp}$.

*2 При уменьшении температуры от 298 до 78 К значение χ увеличивается на 12%.

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
$Ba(NO_3)_2$	298	—0,254	[1]
BaO	298	—0,19	[1]
BaO_2	298	—0,240	[1]
$Ba(OH)_2$	298	—0,31	[1]
$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	298	—0,497	[1]
BaS	291	—0,32	[7]
$BaSO_4$	298	—0,306	[1]
$BaS_2O_6 \cdot 2H_2O$	293	—0,359	[30]
La*1	293	0,73	[139]
La*1	298	0,85	[1]
LaB_6	298	—0,294	[10]
$LaCl_3$	288	5,6	[7]
$La(NO_3)_3$	298	—0,072	[10]
La_2O_3	298	—0,24	[1]
La_2S_3	292	—0,099	[1]
La_2S_4	293	—0,246	[1]
LaS_3	293	—0,03	[140]
LaS_4	293	—0,26	[140]
$La_2(SO_4)_3$	293	—0,30	[43]
$La_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	293	—23	[1]
Hf*2	4,2	0,46	[141]
Hf*2	77	0,40	[141]
Hf*2	293	0,39	[142]
HfO_2	293	—0,109	[65]
HfP	297	—0,10	[52]
HfS_2	293	0,005	[53]
HfS_3	90—573	—0,21	[143]
Ta*3 (п/к)	293	0,85	[1]
Ta*3 (п/к)	2143	0,685	[1]
$TaBr_4$	293	—0,15	[144]
$TaCl_5$	304	0,391	[1]
Ta_3N_5	293	—0,008	[145]
TaO_2	293	0,32	[146]
Ta_2O_5*4	293	—0,095	[145]
TaON	293	—0,064	[145]
TaP	297	—0,62	[52]
$TaBr_4$	293	—0,15	[144]
W*5	293	0,29	[44]
WBr_4	297	—0,149	[147]
WBr_6	293	0,03	[148]
WC	293	0,05	[1]
WCl_2	293	—0,098	[1]
WCl_4	303	—0,178	[147]
WCl_6	298	—0,179	[1]
WF_6	298	—0,134 (ж)	[1]
WO_2	298	0,264	[1]
W_2O_5	293	0,20	[148]
WO_3	298	—0,068	[1]
Re*6	293	0,363	[1]
ReO_2 (ромбический)	77—300	0,25	[149]
ReO_2 (моноклинный)	300	0,44	[149]
Re_2O_2	293	0,2	[150]
ReO_3	298	0,088	[151]
Re_2O_7	298	—0,033	[1]
$ReO_2 \cdot 2H_2O$	295	—0,291	[1]
ReS	293	0,2	[152]
ReS_2	290,5	—0,50	[153]
Re_2S_7	290—373	0,19	[153]
Os	298	0,052	[1]

*1 См. рис. 26.8.
*2 См. рис. 26.9, 26.30.
*3 См. рис. 26.31.
*4 При $H \to \infty$.
*5 См рис. 26.32.
*6 См .рис. 26.32.

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
Os	698	0.070	[10]
Os	$T>T_{пл}$	0,14 (ж)	[10]
$OsAs_2$	90—800	—0,3279	[73]
$OsCl_2$	298	0,158	[10]
$OsCl_3$	295,5	3,04	[154]
$OsCl_4$ (ромбический)	300	3,25	[155]
$OsCl_4$ (кубический)	300	2,65	[155]
OsI_3	295	0,557	[156]
OsO_2	77	0,536	[157]
OsO_2	300	0,528	[157]
OsO_4	77	—0,045	[157]
OsO_4	300	—0.048	[157]
OsP_2	90—760	—0,3845	[88]
Ir*1	293	0,14	[26]
Ir*1	698	0,167	[1]
Ir*1	1423	0,31	[14]
$IrBr_3$	293	—0,2	[158]
$IrCl_3$ (ромбический)	298	—0,183	[159]
$IrCl_3$ (моноклинный)	298	0	[159]
IrO_2 (м/к), χ_a	300	0,92 (0,02)	[160]
IrO_2 (м/к), χ_c	300	0,83 (0,02)	[160]
Pt*2	20	1,094	[115]
Pt*2	293	0,97	[44]
Pt*2	623	0,795	[161]
Pt*2	1493	0,30	[14]
PtCl	298	—0,51	[161]
$PtCl_2$	295	0,188	[162]
$PtCl_3$	298	—0,221	[1]
$PtCl_4$	298	—0,276	[1]
$PtCl_2CO$	293	—0,289	[109]
$PtCl_2 2CO$	293	—0,37	[109]
Pt_2O_3	298	—0,086	[1]
PtI_2	300	0,225	[163]
PtI_3	300	0,234	[163]
PtI_4	300	0,285	[163]
PtS	195—723	—0,14	[164]
PtS_2	90—723	—0,28	[164]
PtSe	195—723	—0,11	[164]
$PtSe_2$	90—723	—0,13	[164]
PtTe	195—723	—0,12	[164]
$PtTe_2$	90—723	—0,05	[164]
Au*3	14	—0,132	[165]
Au*3	296	—0,142	[1]
Au*3	975	—0,1417	[117]
Au*3	$T>T_{пл}$	—0,17	[1]
AuBr	298	—0,22	[1]
$AuCl_3$	298	—0,37	[1]
AuCl	298	—0,288	[1]
AuF_3	298	0,291	[1]
AuI	298	—0,28	[1]
AuP_3	298	—0,369	[1]
Hg*4 (п/к)	80	—0,118 (тв)	[166]
Hg*4 (п/к)	293	—0,167 (ж)	[1]
Hg*4 (п/к)	560,5	—0,1637 (ж)	[167]
Hg*4 (п/к)	$T>T_{исп}$	—0,39 (г)	[1]
Hg (м/к), $\chi_{\parallel}$	80	—0,112	[166]
Hg (м/к), $\chi_{\perp}$	80	—0,121	[166]
$HgBr_2$	298	—0,261	[1]
HgBr	298	—0,204	[1]

*1 См. рис. 26.21.
*2 См. рис. 26.33.
*3 См. рис. 26.34.
*4 См. рис. 26.35.

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
$HgBrO_3$	298	—0,239	[10]
$Hg(CH_3)_2$	293	—0,199	[36]
$Hg(C_2H_5)_2$	293	—0,158	[36]
$Hg(C_4H_9)_2$	293	—0,115	[36]
$Hg(C_5H_{11})_2$	293	—0,103	[36]
$Hg(C_2H_3O_2)_2$	301	—0,317	[1]
$Hg_2(C_2H_3O_2)_2$	300	—0,276	[4]
$Hg(CN)_2$	298	—0,265	[1]
HgCl	298	—0,22 (тв)	[1]
HgCl	$T>T_{пл}$	—0,248 (ж)	[10]
$HgCl_2$	298	—0,302	[1]
Hg_2Cl_2	298	—0,253	[4]
$HgCrO_4$	298	—0,039	[1]
Hg_2CrO_4	298	—0,122	[1]
HgF	298	—0,241	[1]
HgF_2	302	—0,260	[1]
HgI	298	—0,253	[1]
HgI_2	298	—0,283	[1]
$HgIO_3$	298	—0,245	[1]
$HgNO_3$	298	—0,213	[1]
$Hg(NO_3)_2$	298	—0,228	[1]
$Hg(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	298	—0,225	[4]
HgO	298	—0,20	[1]
Hg_2O	298	—0,183	[1]
$Hg_2(OH)_2$	298	—0,23	[1]
HgS	298	—0,238	[1]
$Hg(SCN)_2$	298	—0,305	[1]
$HgSO_4$	298	—0,263	[1]
Hg_2SO_4	298	—0,247	[1]
α-Tl (п/к) (гексагональный)	14,2	—0,258	[136]
α-Tl (п/к) (гексагональный)	298	—0,249	[1]
β-Tl (п/к) (кубический)	>508	—0.158	[1]
Tl	573	—0,131 (ж)	[1]
α-Tl*1 (м/к), $\chi_{\parallel}$	293	—0,420	[10]
α-Tl*1 (м/к), $\chi_{\perp}$	293	—0,164	[168]
TlBr	298	—0,225	[1]
$TlBrO_3$	298	—0,228	[1]
$TlC_2H_3O_2$	298	—0,262	[1]
TlCN	298	—0,213	[1]
TlCNS	298	—0,254	[1]
$TlCO_3$	298	—0,217	[1]
TlCl	298	—0,241	[1]
$TlClO_3$	298	—0,228	[1]
$TlCrO_4$	298	—0,075	[1]
TlF	298	—0,199	[1]
TlI	298	—0,248	[1]
$TlIO_3$	298	—0,229	[1]
$TlNO_2$	298	—0,203	[1]
$TlNO_3$	298	—0,212	[1]
Tl_2O_3	298	—0,166	[1]
Tl_3PO_4	298	—0,304	[1]
Tl_2S	298	—0,201	[1]
Tl_2SO_4	298	—0,223	[1]
Pb (п/к)	14,2	—0,132	[109]
Pb (п/к)	289	—0,111	[1]
Pb	330	—0,075 (ж)	[1]
Pb*2 (м/к)	293	—0,114	[127]
$PbBr_2$	298	—0,247	[1]

*1 См. рис. 26.6.
*2 См. рис. 26.27; анизотропия χ в плоскости (100) отсутствует [130].

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
$Pb(C_2H_3O_2)_2$	298	—0,274	[1]
$Pb(CNS)_2$	298	—0,254	[1]
$PbCO_3$	298	—0,229	[1]
$PbCl_2$	298	—0,265	[1]
$PbCrO_4$	298	—0,056	[1]
PbF_2	298	—0,237	[1]
PbI_2	298	—0,274	[1]
$Pb(IO_3)_2$	298	—0,235	[1]
$Pb(NO_3)_2$	298	—0,223	[1]
PbO	298	—0,19	[1]
PbO_2	293	—0,09	[169]
Pb_3O_4	291	—0,24	[7]
$Pb_3(PO_4)_2$	298	—0,224	[1]
PbS (порошок)	293	—0,342	[170]
PbS	293	—0,390	[170]
$PbSO_4$	298	—0,230	[1]
PbSe*1	293	—0,447	[135]
PbTe	293	—0,446 (тв)	[135]
PbTe	293	—0,051 (ж)	[134]
Bi*2 (п/к)	14	—1,55	[171]
Bi*2 (п/к)	298	—1,34	[1]
Bi*2	$T > T_{пл}$	—0,0502 (ж)	[1]
Bi (м/к), $\chi_{\parallel}$	14	—1,20	[171]
Bi (м/к), $\chi_{\parallel}$	85	—1,295	[172]
Bi (м/к), $\chi_{\parallel}$	298	—1,053	[173]
Bi (м/к), $\chi_{\perp}$	14	—1,77	[171]
Bi (м/к), $\chi_{\perp}$	85	—2,04	[172]
Bi (м/к), $\chi_{\perp}$	298	—1,482	[173]
$BiBr_3$	298	—0,328	[1]
$BiCl_3$	298	—0,084	[1]
$Bi_2(CrO_4)_3$	298	0,201	[1]
BiF_3	303	—0,23	[1]
BiI_3	298	—0,34	[1]
$Bi(NO_3)_3$	298	—0,23	[1]
$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$	298	—0,328	[1]
BiO	298	—0,49	[1]
Bi_2O_3	298	—0,18	[1]
$Bi(OH)_3$	298	—0,253	[1]
$PiPO_4$	298	—0,253	[1]
Bi_2S_3	298	—0,239	[1]
$Bi_2(SO_4)_3$	298	—0,282	[1]
Bi_2Se_3	130—600	—0,410	[135]
BiTe	293	—0,57	[13]
Bi_2Te_3	130—600	—0,402	[135]
Th	90	0,66	[1]
Th	298	0,57	[1]
Th	130—300	0,410	[174]
$ThCl_4 \cdot 8H_2O$	305,2	—0,348	[1]
$Th(NO_3)_4$	298	—0,225	[1]
ThO_2	83	—0,056	[175]
ThO_2	298	—0,061	[1]
α-U*3	80	1,63	[176]
α-U*3	293	1,72	[176]
α-U*3	623	1,85	[1]
β-U*3, *4	288—1193	2,02	[176]

*1 Решеточная часть χ.
*2 См. рис. 26.36.
*3 См. рис. 26.37.
*4 α-U переходит в β-U при $T = 933$ К.

Продолжение табл. 26.1

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м³/кг	Литература
γ-U*1	288—1193	2,06	[176]
UF_6	90	0,01	[177]
UF_6	293	0,12	[177]
UO_3	293	4,5	[1]
UOS	290,5	10,527	[178]
U_2S_2	293	4,545	[179]
U_3Se_5	293	3,567	[180]
α-Np	300	2,34	[181]
α-Pu*2	293	2,5	[1]
α-Pu*3	78—793	2,35*2	[181]
β-Pu*4	78—793	2,44*2	[182]
γ-Pu*5	78—793	2,36*2	[182]
δ-Pu*6	78—793	2,31	[182]
ε-Pu	78—793	2,36	[182]
PuF_6	295	0,483	[1]
PuO_2	300	2,645	[1]
Am	300	4,0	[1]
Am	300	2,82	[181]

*1 β-U переходит в γ-U при $T = 1040$ К.
*2 См. рис. 26.38; α-Pu переходит в β-Pu при $T = 400$ К
*3 Приведено среднее значение χ для указанного интервала
*4 β-Pu переходит в γ-Pu при $T = 490$ К.
*5 γ-Pu переходит в δ-Pu при $T = 590$ К.
*6 δ-Pu переходит в ε-Pu при $T = 740$ К.

Таблица 26.2. **Магнитная восприимчивость парамагнетиков, температурная зависимость которых удовлетворяет закону Кюри — Вейсса**

Вещество	T, К	χ_A, 10^{-9} м³·кг$^{-1}$	ΔT, К	$p_{эф}$, μ_B	θ, К	Литература
Sc (тв)	292	7,0	—	1,8	—950÷—1000	[10]
$TiBr_2$	288	3,10	90—300	2,8	—1110	[10]
TiS_2	296	0,408	—	0,52	—	[53]
$Ti_2(SO_4)_3$	—	—	14—290	1,41	—	[10]
VBr_2	293	15,3	—	4,30	—400	[191]
VBr_3	293	9,95	—	2,72	—20	[191]
VCl_2	293	19,8	14—300	4,15	—565	[10]
VCl_4	293,8	5,86	—	1,62	±1	[192]
VF_3	293	2,53	—	2,55	—	[193]
VI_2 (красный)	295	14,0	—	3,32	—140	[194]
VI_2 (красный)	90	26,6	—	2,43		[194]
VI_2 (черный)	295	13,8	—	3,27	—140	[194]
VI_2 (черный)	90	26,3	—	2,42		[194]
VI_3	295	8,02	—	2,92	—	[194]
VI_3	90	39,0		3,50	—	[194]
VOCl	293	20,3	—	2,22	—	[195]
VTe	293	>0	—	1,7	0	[10]
CrB_2	—	—	100—600	2,07	—1550	[196]
CrH	295	13,63	—	1,77	—247	[197]
$CrSO_4$	—	—	—	4,80	—	[198]
$Cr_2(SO_4)_3$	293	30,1	90—900	3,84	—16	[10]
MnF_4	—	—	90—295	3,84	—10	[199]
$Fe(OH)_2$	301,4	124,6	—	5,22	—	[200]
$Fe_2(SO_4)_3$	283	30,6	65—300	5,8	—65	[10]

Продолжение табл. 26.2

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м^3·кг$^{-1}$	ΔT, К	$p_{эф}$, μ_B	θ, К	Литература
$Fe_2(SO_4)_3$	—	—	300—900	5,8	—75	[10]
Co_2O_3	293	27,5	—	2,3	—	[201]
$CoTe_2$	293	3,11	90—723	2,81	—540	[202]
NiI_2	293	12,4	83—603	3,25	—42	[10]
NiS_2	—	—	4—440	3,15	—2100	[203]
NiS_2	—	—	440—900	2,70	—1000	[203]
NiTe	293	0,844	—	0,61	—	[204]
NiTe	—	—	90—600	0,99	—1100	[205]
$NiTe_2$	293	0,445	100—400	0,57	—	[204]
CuS_2	298	0,29	4,2—100	0,58	—25	[206]
$ZrBr_3$	300	0,18	—	$\approx$0,4	—	[207]
$ZrCl_2$	300	0,925	—	0,6	—	[207]
$ZrCl_3$	300	0,35	—	$\approx$0,4	—	[207]
ZrS_2	296	0,535	—	0,61	—	[53]
NbF_3	293	0,95	—	0,7	—180	[208]
NbO	295	0,29	1,5—150	0,052	—	[108]
NbO_2	295	0,05	—	0,32	—	[209]
Nb_2O_5	295	0,09	1,5—150	0,237	0	[108]
NbS_2	293	0,39	—	0,98	—1100	[146]
$MoBr_2$	293	1,34	—	0,35	—	[210]
$MoBr_3$	293	1,56	—	1,24	—	[210]
$MoBr_4$	293	1,62	—	1,02—1,28	—	[210]
$MoCl_3$	290	0,21	—	0,67	—	[210]
$MoCl_4$	296	9,6	—	2,54	—39	[211]
α-$MoCl_4$	299,6	0,856	—	$\approx$0,85	—	[212]
$MoCl_5$	305	3,80	—	1,52	23	[213]
$MoCl_5$	—	—	195—293	$\approx$1,6	—	[10]
$TcCl_4$	306	20,5	—	3,14	57	[213]
RuF_4	—	—	—291	3,04	—74	[214]
RuF_5	—	—	292	3,60	—	[214]
RuO_2	298	1,22	—	0,62	—	[161]
RhF_4	293	2,99	—	1,1	—	[193]
Pd	288	5,333	450—1000	1,62	—228	[10]
Pd	—	—	>1000	1,82	—578	[10]
PdF_5	293	14,3		2,05	—	[193]
CeB_6	293	11,0	620—1030	291	—344	[10]
CeF_3	293	11,1	100—293	2,51	—62	[10]
Ce_2S_3	292	13,5	—	2,66	—57	[10]
$CeSn_3$	—	—	—	2,8	—	[215]
Pr_2O_3	—	—	—	3,59	—73	[215]
NdB_6		>0	620—1030	3,82	—455	[10]
NdF_3	293	24,7	153—373	3,75	—56	[10]
$Nd(NO_3)_3$	293	15,2	83—373	3,72	—49	[10]
$Nd_2(SO_4)_3$	293	17,3	83—373	3,69	—42	[10]
			300—673	3,47	—18	[10]
Nd_2Se_3	—	>0	—	3,58	—33	[10]
Nd_2O_3	—	—	—	3,66	—27	[215]
Sm_2O_3	293	5,15	—	1,50	—150	[10; 215]
$EuBr_2$	292	86,2	90—292	7,95	0	[10]
$EuCl_2$	292	119	90—292	7,91	0	[10]
Eu_2O_3	298	28,7	180—673	3,62	—135	[10]
$Eu_2(SO_4)_3$	293	17,6	293—628	3,62	—100	[10]
GdB_6	—	—	623—1033	7,63	—49	[10]
GdC_2	—	—	80—300	7,95	—44	[10]
GdH_2	—	—	80—300	7,83	11	[10]
$Gd_2(SO_4)_3$	285,5	89,9	83—700	7,92	—0,4	[10]
$GdSn_3$	—	—	—	8,0	—73	[215]
$Tb_2(SO_4)_3$	293	129	293—630	9,63	—2,3	[10]
$Er_2(SO_4)_3$	293—700	>0	293—700	9,53	—10,8	[10]
Er_2Se_3	—	>0	—	9,63	—5	[10]

Продолжение табл. 26.2

Вещество	T, К	χ, 10^{-9} м^3·кг$^{-1}$	ΔT, К	$p_{эф}$, μ_B	θ, К	Литература
Tm_2O_3	296,5	133	290—700	7,28	—41,6	[10]
Tm_2O_3	—	—	—	9,43	—25	[215]
YbB_6	—	—	623—1033	4,58	—2	[10]
$Yb_2(SO_4)_3$	293	11,7	290—700	4,83	—82	[10]
Yb_2Se_3	—	>0	90—293	4,75	—63	[10]
HfS_2	296	0,005	—	0,44	—	[53]
TaF_3	293	3,34	—	1,4	—	[193]
TaS	293	0,11	—	0,57	—690	[205]
WBr_3	293	0,88	—	0,94	—	[216]
WBr_5	293	0,43	195—293	$\approx$1	0	[10]
WBr_5	302,3	1,0	—	1,19	—7	[217]
WCl_5	293	1,07	90—293	$\approx$1,1	13	[10]
WCl_5	300,6	1,20	—	1,02	20	[217]
$ReBr_3$	—	—	293	0,17		[218]
$ReCl_3$	305	1,38	—	2,04	—985	[213]
$ReCl_4$	300	1,99	220—300	1,55	—158	[219]
$ReCl_5$	293	3,37	90—290	2,32	—265	[10]
$ReCl_5$	302	4,01	77—300	2,57	—266	[219]
$ReCl_5$	—	—	<150	2,21	—164	[219]
$ReCl_6$	297	4,25	98—297	2,07	—30	[219]
ReO_2	293	0,20	—	0,49	—	[220]
$ReOCl_4$	—	—	90—300	1,51	—25	[10]
ReS_2	293	0,15	—	0,38	—	[220]
$OsCl_4$	—	—	294	2,02	—	[221]
OsF_5	—	—	295,4	2,31	—	[222]
OsF_6	—	—	297	1,50	—66	[223]
OsF_7	195	2,65	195	1,19	—	[224]
$IrCl_4$	—	—	293	1,98	—	[225]
IrF_6	—	—	293,6	$\approx$2,90	—30	[226]
IrO_2	298	0,997	300—700	2,8	—4025	[10]
Pt	290,3	1,035	290—720	1,61	—1096	[10]
Pt	—	—	>900	1,81	—1617	[10]
PtF_4	292	1,68	—	1,1	—	[227]
UBr_3	294	9,92	290—480	3,29	25	[10]
UBr_4	293	6,33	77—570	3,12	—35	[10]
UCl_3	300	10,0	300—509	3,03	—29	[10]
UCl_4	294	9,69	90—550	3,29	—62	[10]
UF_4	300	11,24	77—500	3,28	—116	[10]
UI_3	293	7,2	200—394	3,31	5	[10]
$U(SO_4)_2$	298	0,072	150—300	3,46	—110	[10]
$PuCl_3$	—	>0	90—590	1,1—1,4	—	[10]
PuF_4	301	5,5	200—450	2,4	—100	[10]

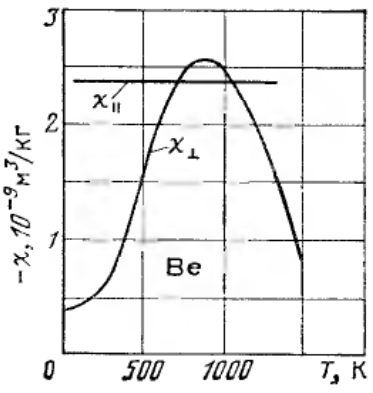


Рис. 26.1. Зависимости $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ для Be от температуры [183]

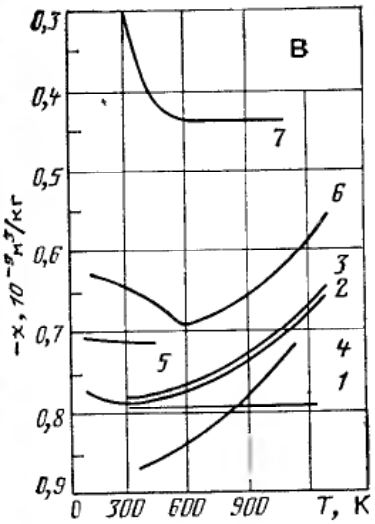


Рис. 26.2. Зависимость удельной магнитной восприимчивости B от температуры по данным разных работ:

1 — α — B; *2—5* — β — B; *6*, *7* — аморфный B [184]

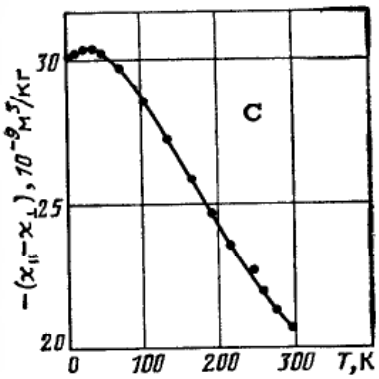


Рис. 26.3. Зависимость $\chi_{\perp}-\chi_{\parallel}$ для графита от температуры [19]

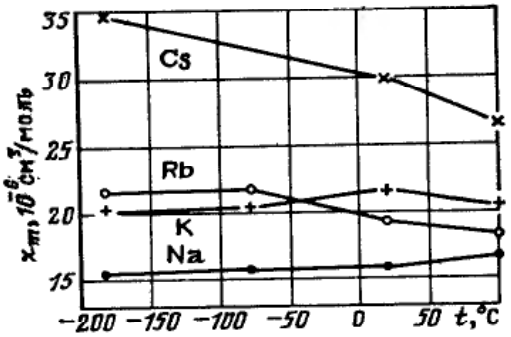


Рис. 26.4. Зависимость χ_m для Cs, Rb, Na, K от температуры [185, 186]

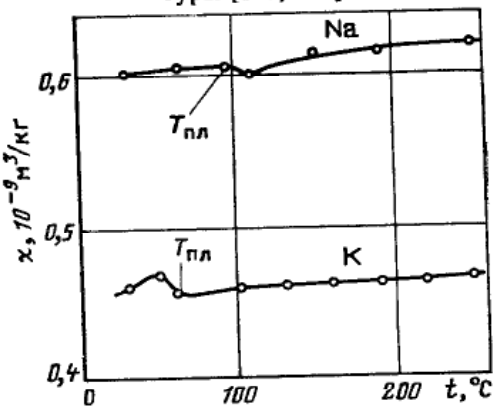


Рис. 26.5. Зависимость χ для Na и K от температуры [26, 185]

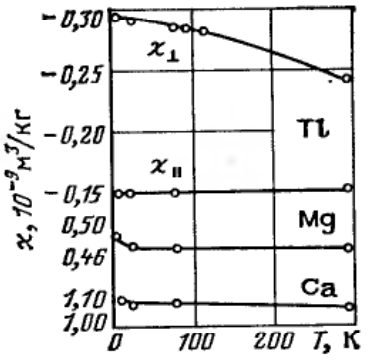


Рис. 26.6. Зависимость χ для Ca, Mg, Tl от температуры [33]

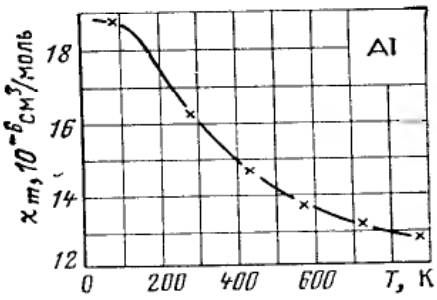


Рис. 26.7. Зависимость χ_m для Al от температуры [33]

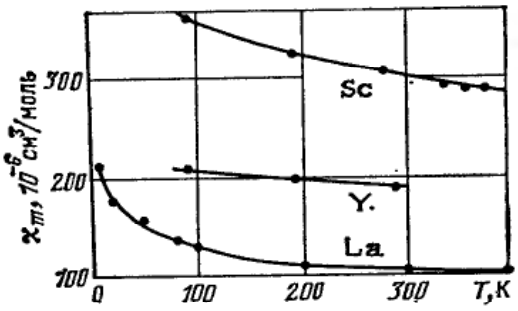


Рис. 26.8. Зависимость χ_m для La, Sc, Y от температуры: La [41, 139]; Sc, Y [41, 185]

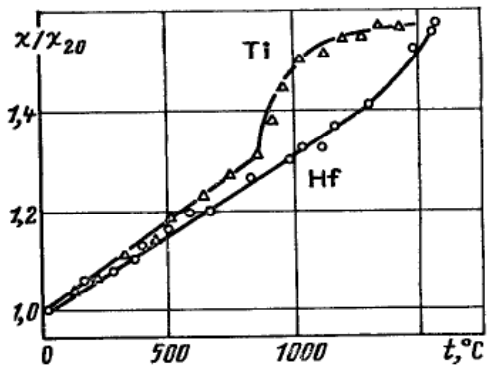


Рис. 26.9. Зависимость χ/χ_{20} для Ti, Hf от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20°C) [44]

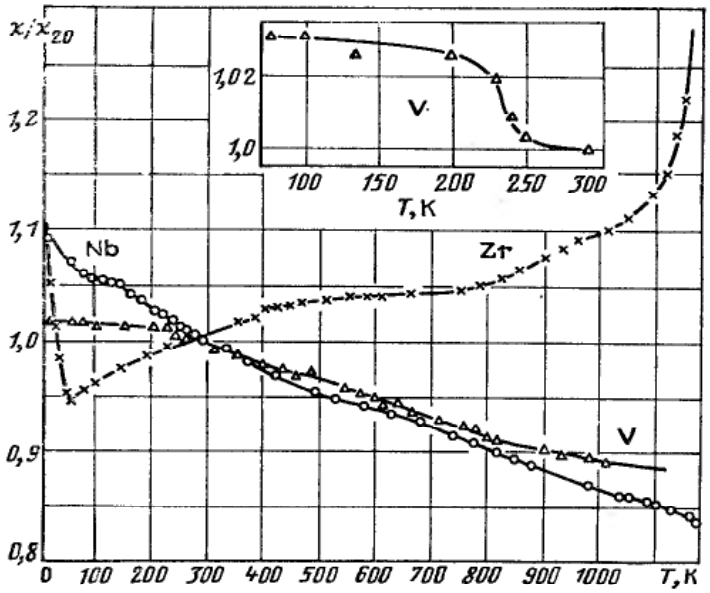


Рис. 26.10. Зависимость χ/χ_{20} для V, Zr, Nb от температуры (χ_{20}—восприимчивость при 20°С) [57]. На вставке — аномальная зависимость χ/χ_{20} для V при низких температурах

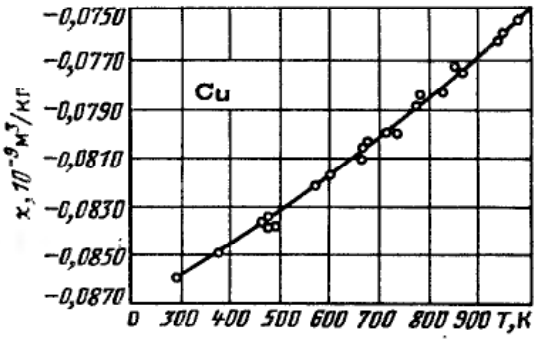


Рис. 26.11. Зависимость χ для Cu от температуры [117]

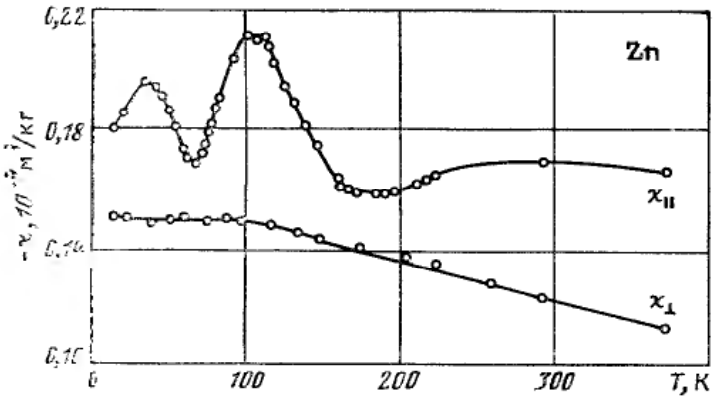


Рис. 26.12. Зависимости $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ для Zn от температуры [118, 185] ($H=65{,}7\cdot10^4$ А/м)

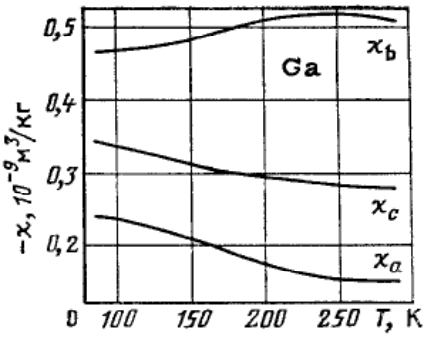


Рис. 26.13. Зависимости χ_a, χ_b, χ_c для Ga от температуры [187]

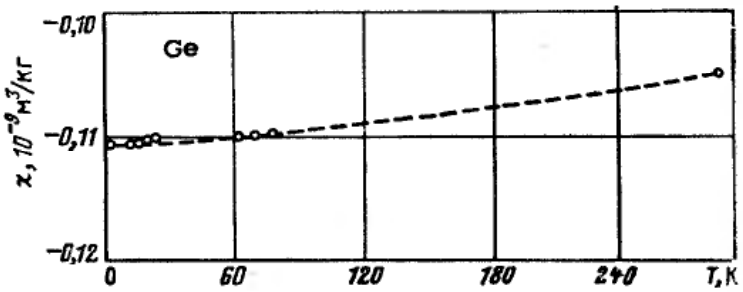


Рис. 26.14. Зависимость χ для Ge от температуры. Удельное сопротивление 44—46 Ом·см; концентрация примеси Sb ниже 10^{14} см$^{-3}$ [94]

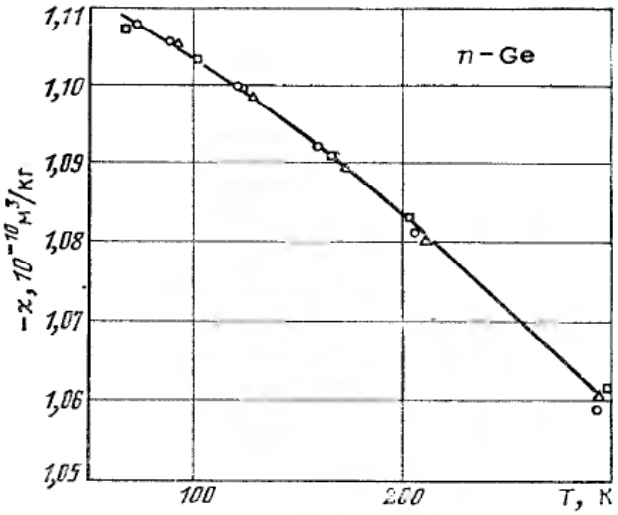


Рис. 26.15. Зависимоость χ для n — Ge от температуры: Концентрация носителей в образцах: ○, △ — 10^{13} см$^{-3}$; □ — 10^{14} см$^{-3}$ [54, 185]

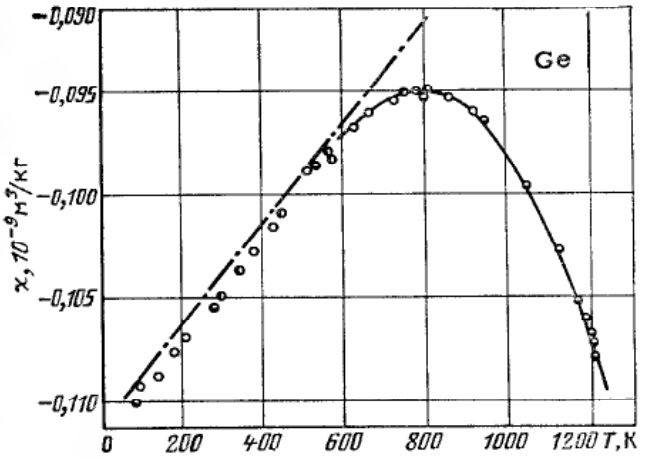


Рис. 26.16. Зависимость χ для Ge от температуры [130, 185]

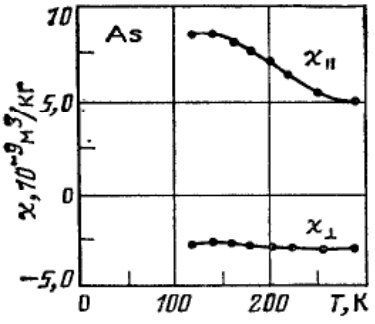


Рис. 26.17. Зависимости $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ для As от температуры [188]

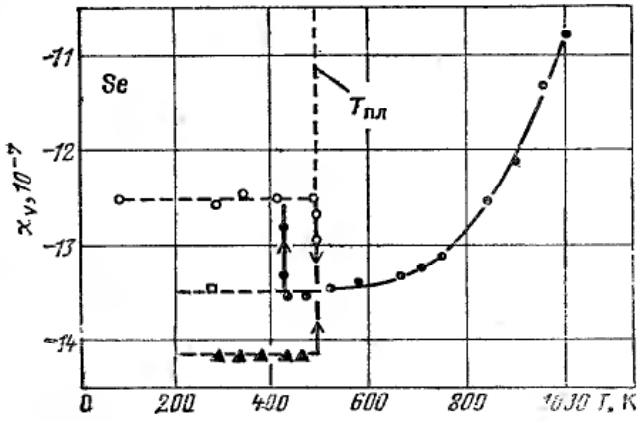


Рис. 26.18. Зависимость γ_V для твердого и жидкого Se от температуры [101]:

○ — гексагональный Se (медленное охлаждение от $T_{пл}$); □ — аморфный (закалка от $T_{пл}$ до 280 К); ▲ — моноклинный (отжиг при 450° К); ● — жидкий

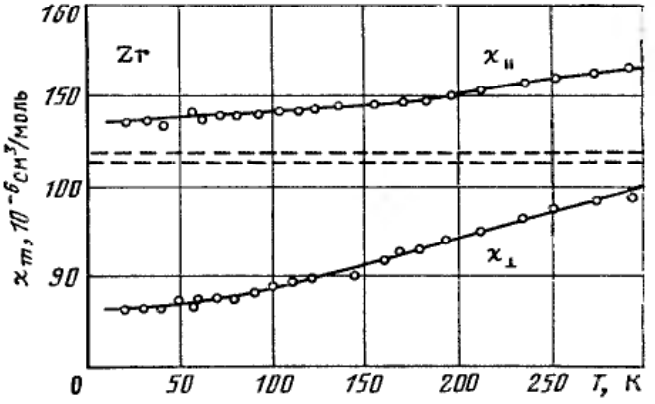


Рис. 26.19. Зависимости $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ для Zr от температуры [189] ($H = 8{,}75 \cdot 10^5$ А/м)

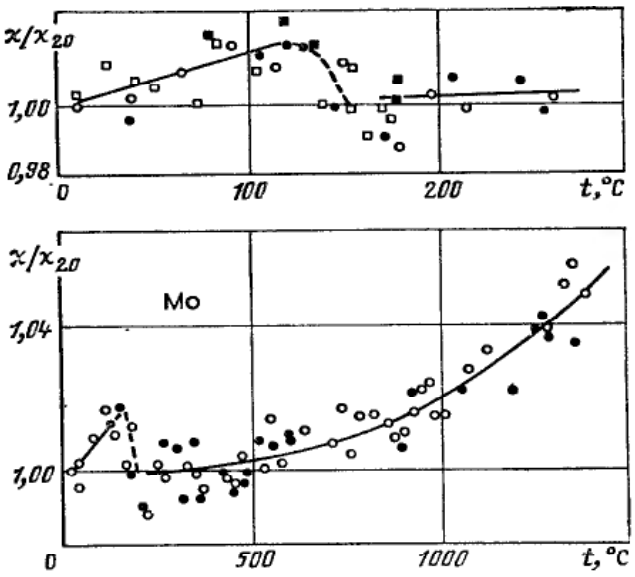


Рис. 26.20. Зависимость χ/χ_{20} для Mo от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20° С) [44] (точки — разные циклы измерений)

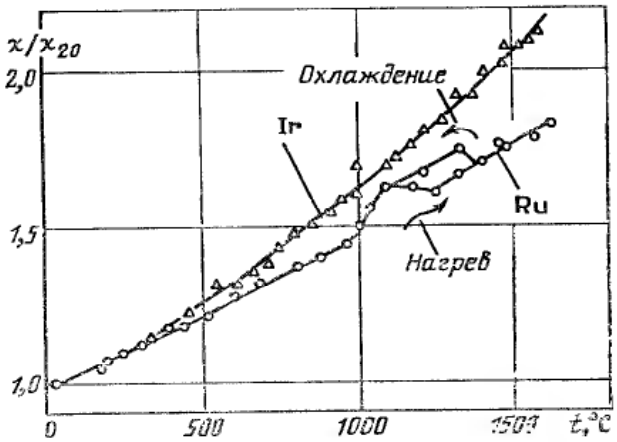


Рис. 26.21. Зависимость χ/χ_{20} для Ru и Ir от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20°С) [4]

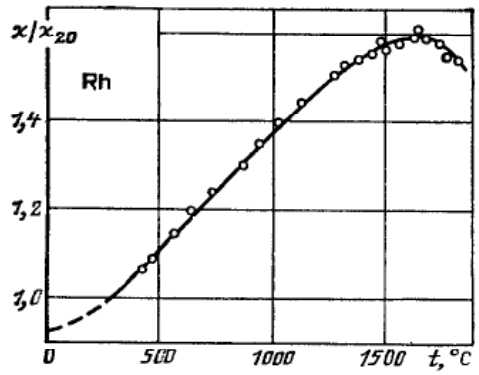


Рис. 26.22. Зависимость χ/χ_{20} для Rh от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20°C) [44]

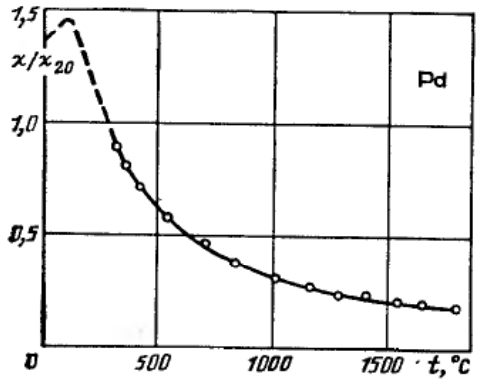


Рис. 26.23. Зависимость χ/χ_{20} для Pd от температуры (χ — восприимчивость при 20°C) [44]

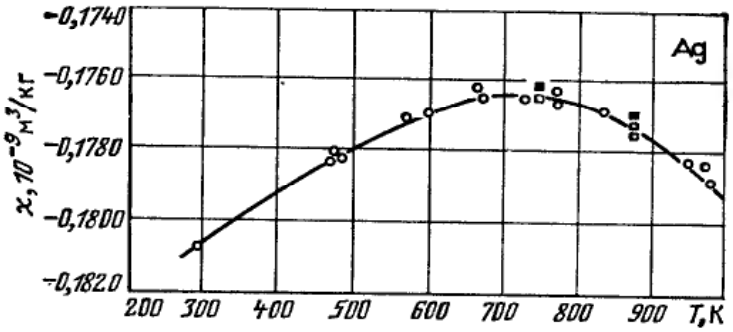


Рис. 26.24. Зависимость χ для Ag от температуры [117]:
○ — нормальный образец; ■ — выдержка в течение 12 ч при температуре измерения; □ — обезгаженный образец

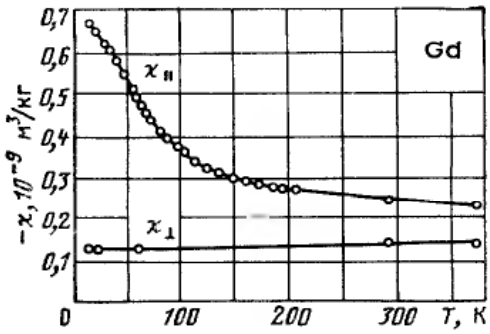


Рис. 26.25. Зависимости $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ для Cd от температуры [118, 185]

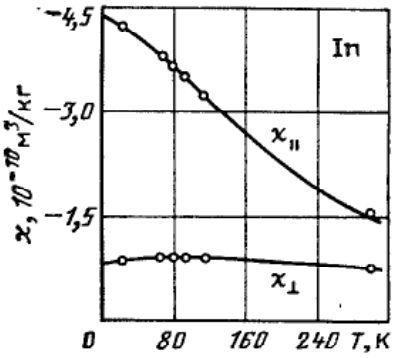


Рис. 26.26. Зависимости $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ для In от температуры [127]

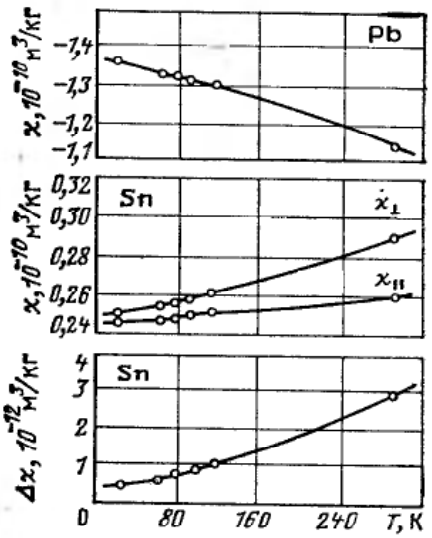


Рис. 26.27. Зависимости χ для Sn и Pb и $\Delta\chi=\chi_{\perp}-\chi_{\parallel}$ для Sn от температуры [127]

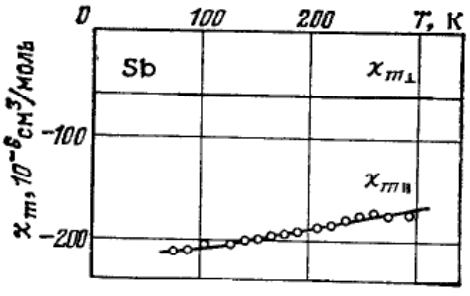


Рис. 26.28. Зависимости $\chi_{m\parallel}$ и $\chi_{m\perp}$ для Sb от температуры [190]

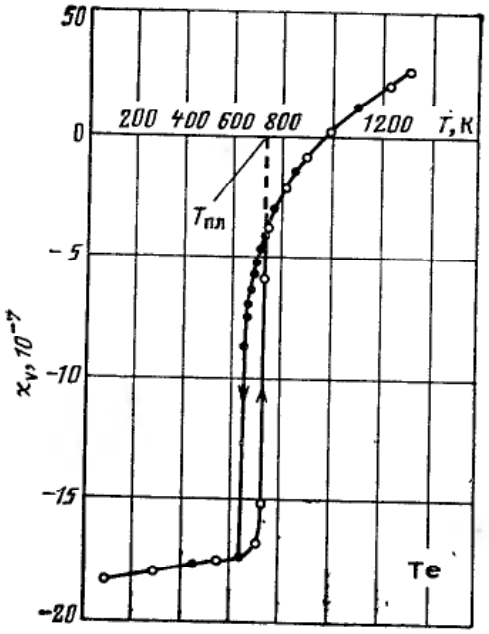


Рис. 26.29. Зависимость χ_v для твердого и жидкого Te от температуры [101]:
○ — нагрев; ● — охлаждение

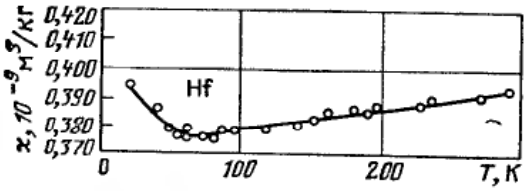


Рис. 26.30. Зависимость χ для Hf от температуры [142]

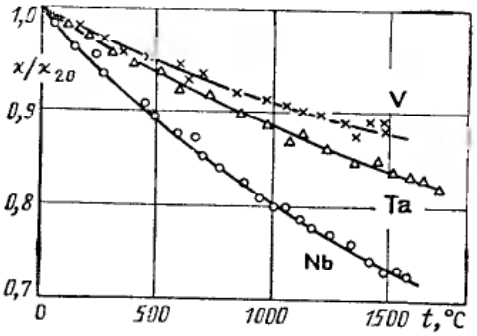


Рис. 26.31. Зависимость χ/χ_{20} для V, Ta, Nb от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20°C) [44]

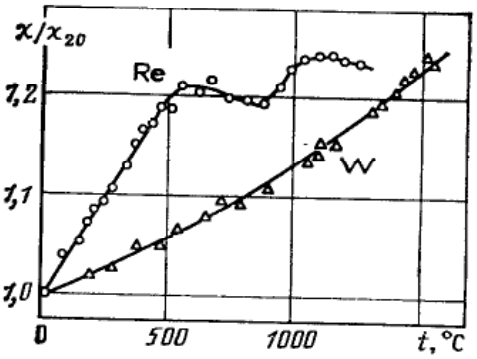


Рис. 26.32. Зависимость χ/χ_{20} для Re и W от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20°C) [44]

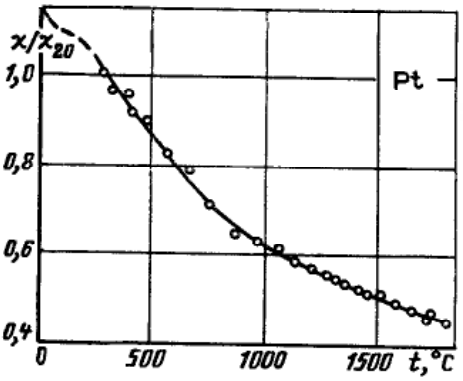


Рис. 26.33. Зависимость χ/χ_{20} для Pt от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20°C) [44]

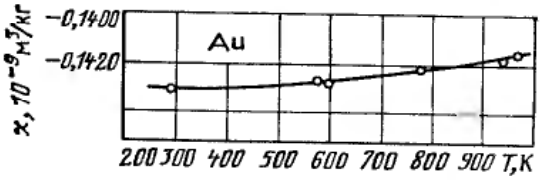


Рис. 26.34. Зависимость χ для Au от температуры [117]

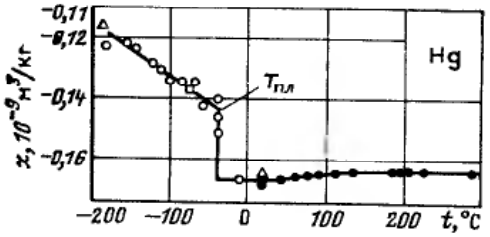


Рис. 26.35. Зависимость χ для Hg от температуры [185]:
○, △, □, ● — данные разных авторов

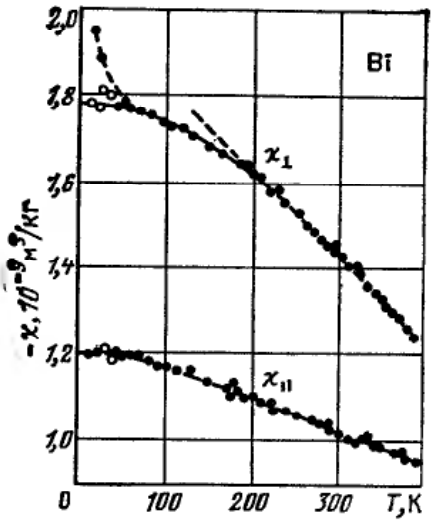


Рис. 26.36. Зависимости $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ для Bi от температуры [185]

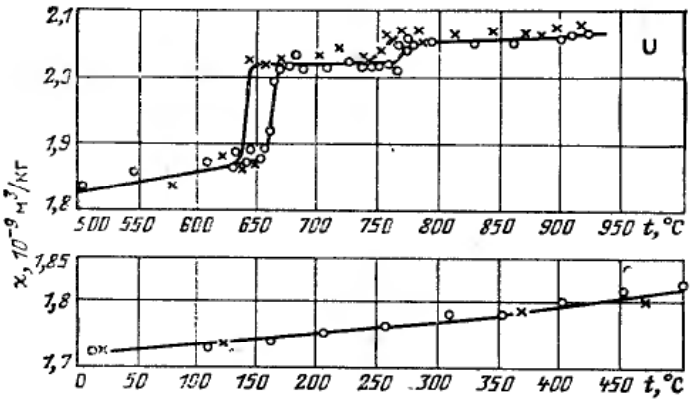


Рис. 26.37. Зависимость χ для U от температуры [176, 185]:

○ — нагрев; × — охлаждение

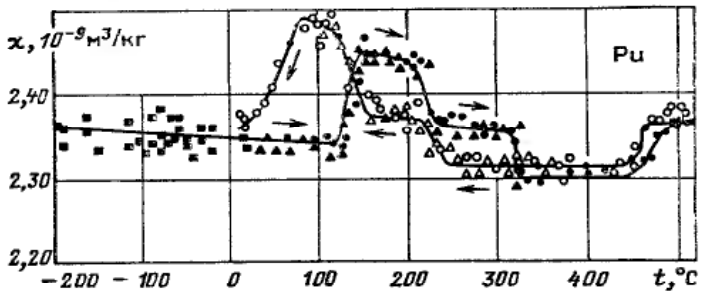


Рис. 26.38. Зависимость χ для Pu от температуры [181, 185]:

▲ ● — измерения при нагреве; △, ○ — при охлаждении; ■ — при низких температурах

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **CRC Handbook** of Chemistry and Physics. Ed. 63rd. 1982—1983.

2. **Havens G.**//Phys. Rev. 1933. Vol. 43. P. 992—998.

3. **Onnes H. K., Perrior A.**//Proc. Acad. Sci. Amsterdam. 1911. Vol. 14. P. 115—122.

4. **Kido K.**//Sci. Repts. Tôhoku Univ. 1932. Vol. 21. P. 149—151, 288—289, 869—872.

5. **Ehrlich P.**//Z. Anorgan. und allgem Chem. 1942. Bd. 249. S. 219—224.

6. **Cabrera B., Fahlenbrach H.**//Ann. Soc. Espan. Fôs. Quim. 1934. Vol. 32. P. 525—537.

7. **Meyer St.**//Phys. Z. 1925. Bd. 26. S. 51—54.

8. **Witmer E. E.**/Phys. Rev. 1942. Vol. 61. P. 387—392.

9. **Collings E. W.**//J. Phys. Chem. Solids. 1965. Vol. 26. P. 949—954.

10. **Foëx G.** Tables de Constantes et Données Numériques 7. Constantes Sélectionnées Diamagnétisme et Paramagnétisme. Paris. 1957.

11. **Веркин Б. И., Дмитренко И. М., Свечкарев И. В.**// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 40. С. 670—675.

12. **Owen M.**//Ann. Phys. 1912. Bd. 37. S. 657.

13. **Klemm L.**//Z. Electrochem. 1939. Bd. 45. S. 354—357.

14. **Honda K.**//Ann. Phys. 1910. Vol. 32. P. 1003—1063.

15. **Soloviev N. E., Makarov V. S., Ugai Ya. A. e. a.**// J. Less-Common. Met. 1979. Vol. 67. P. 161—164.

16. **Kubler L., Gewinner G., Koulmann e. a.**//Phys. Stat. Solidi (b). 1975. Vol. 69. P. 323—328.

17. **Hudgens S., Kastner M., Fritzsche H.**//Phys. Rev. Lett. 1972. Vol. 33. P. 1552—1554.

18. **De Haas W., van Alphen P. M.**//Proc. Koninke Nederl. Acad. Wet. Amsterdam. 1933. Vol. 36. P. 263—270.

19. **Mauroubi A., Flandorois S., Coulon C.** e. a.// J. Phys. Chem. Sol. 1982. Vol. 43. P. 1103—1109.

20. **Pascal P.**//Compt. rend. 1908. Vol. 147. P. 56—58, 242—244, 742—744; 1910. Vol. 150. P. 1167—1169; Ann. chimie et de phys. 1910. Vol. 19. P. 5—70.

21. **Pascal P.**//Compt. rend. Paris. 1909. Vol. 148. P. 413—415.

22. **Joussot-Dubien J., Lemanceau B., Pacault A.**// J. Chim. Phys. 1956. Vol. 53. P. 198—205.

23. **Bitter F.**//Phys. Rev. 1930. Vol. 35. P. 1572—1577.

24. **De Fotis G. C.**//Phys. Rev. B. 1981. Vol. 23. P. 4714—4740.

25. **Laine P.** Compt. rend. 1933 Vol. 196. P. 910—913.

26. **Venskateswarlu K., Sriraman S.**//Z. Naturforsch. 1958. Bd. 13a. S. 445—451.

27. **Prusad M., Kanekar C. R., Kamat L. S.**//J. Chem. Phys. 1951. Vol. 19. P. 686—689.

28. **Ishiwara T.**//Sci. Repts Tôhoku Univ. Ser. I. 1914. Vol. 3. P. 303—319; 1916. Vol. 5. P. 53—61; 1920. Vol. 9. P. 233—240.

29. **Meslin J.**//Ann. chimie et de phys. 1906. Vol. 7. P. 145—194.

30. **Pascal P.**//Compt. rend. 1921. Vol. 173. P. 144—146, 712—714; 1922. Vol. 174. P. 457—460, 1698—1700; 1923. Vol. 175. P. 1063—1065.

31. **Klemm W., Sodomann H., Langmesser P.**// Z. Anorgan. und allgem. Chem. 1939. Bd. 241. S. 281—304.

32. **Thomas J. G., Mendoza E.**//Philos. Mag. 1951. Vol. 43. P. 900—906.

33. **Веркин Б. И., Свечкарев И. В.**//Укр. физ. журн. 1962. Т. 7, № 3. С. 322—325.

34. **Wilson J.**//Proc. Roy. Soc. 1921. Vol. A98. P. 274—278; 1923, Vol. 103. P. 185—189.

35. **Das D.**//Indian J. Phys. 1967. Vol. 41. P. 525—532.

36. **Pascal P.**//Compt. rend. 1913. Vol. 156. P. 323—327; 1914. Vol. 158. P. 37—38.

37. **Суворова Л. Н., Байдаков Л. А.**//Изв. АН СССР. Неорг. мат. 1977. Т. 13. С. 806—810.

38. **Nilakantan P.**//Proc. Indian Acad. Sci. (A). 1936. Vol. 4. P. 419—422.

39. **Pascal P.** Compt. rend. 1923. Vol. 176. P. 1887—1888; 1923. Vol. 177. P. 765—768.

40. **Endo H.**//Sci. Repts. Tônoku Univ. Ser. 1. 1925. Vol. 14. P. 479—512.

41. **Bommer H.**//Z. Elektrochem. 1939. Bd. 45. S. 357—362.

42. **Volkenshtein N. V., Goloshina E. V., Kost M. E.** e. a.//Phys. Stat. Sol. (b). 1983. Vol. 117. P. K47—K49.

43. **Wedekind E.**//J. Angew. Chemie. 1924. Bd. 37. S. 87—88.

44. **Kojima H., Tebble R. S., Williams D. E. G.**//Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1961. Vol. 260. P. 237—250.

45. **Reekie J., Yao Y. L.**//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1956. Vol. B69. P. 417—431.

46. **Münster A., Lagel K.**/Z. Physik. 1956. Bd. 144. S. 139—145.

47. **Gervais D., Basso-Bert M., Choukroum R.** e. a.// C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. C. 1969. Vol. 269. P. 257—260.

48. **Klemm W., Schüth W.**//Z. anorgan und allgen. Chem. 1931. Bd. 201. S. 24—31.

49. **Васильев Ю. В., Хрищева Д. Д., Ария С. М.**// Журн. неорг. химии. 1963. Т. 8. С. 785—789.

50. **Rüdorff W., Luginsland H. H.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1964. Bd 334. S. 125—132.

51. **Wedekind E., Horst C.**//Ber. chem. Ges. 1912. Bd. 45. S. 262—270; 1915. Bd 48. S. 105—112.

52. **Scott B. A., Eulenberger G. R., Bernheim R. A.**// J. Chem. Phys. 1968. Vol. 48. P. 263—268.

53. **Conroy L. E., Park K. C.**//Inorg. Chem. 1968. Vol. 7. P. 459—467.

54. **Haakon H., Kjekshug A., Rost E. e. a.**//Acta. Chem. Scand. 1963. Vol. 17. P. 1283—1289.

55. **Радовский И. З., Рабинович Б. С., Сидоренко Ф. А. и др.**//Тр. Уральского политехн. ин-та. 1970. Т. 186. С. 155—157.

56. **Robins D. A.**//Philos. Mag. 1958. Vol. 3. P. 313—327.

57. **Suzuki H., Miyahara S.**//Phys. Soc. Japan. 1965. Vol. 20. P. 2102—2108.

58. **Kriessman C. J.**//Rev. Modern. Phys. 1953. Vol. 25. P. 122—126; Phys. Rev. 1954. Vol. 9. P. 837—844.

59. **Whitteker A. G., Yost Don M.**//J. Amer. Chem. Soc. 1949. Vol. 71. P. 3135—3137.

60. **Roch J.**//Compt. rend. 1959. Vol. 249. P. 56—65.

61. **Gervais D., Choukroun R.**//J. Inorg. Chem. 1974. Vol. 36. P. 3679—3687.

62. **Clogston A. M., Gossard A. C., Jaccarino V. e. a.**// Phys. Rev. Lett. 1962. Vol. 9. P. 262—266.

63. **Рыкова М. А., Сабирзянов А. В., Загряжский В. А. и др.**//Тр. Уральского политехн. ин-та. 1970. Т. 186. С. 37—40.

64. **Сидоренко Ф. А., Радовский И. З., Зеленин Л. П. и др.**//Порошковая металлургия. 1966. № 9. С. 68—74.

65. **Tilk W., Klemm W.**//Z. Anorgan. und allgem. Chem. 1939. Bd 240. S. 355—368.

66. **Bartecki A., Wajda S.**//Proc. Symp. Wroclaw, 1962. 1964. P. 305.

67. **Stein B. F., Walmsley R. H.**//Phys. Rev. 1966. Vol. 148. P. 933—940.

68. **Gambino R. J., Mc Guire T. R., Nakamura Y.**// J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 1253—1255.

69. **Радовский И. З., Шубина Т. С., Гельд П. В. и др.**//Порошковая металлургия. 1965. № 2. С. 33—40.

70. **Радовский И. З., Бортник А. Н.**//Тр. Уральского политехн. ин-та. 1968. Т. 167. С. 120—122.

71. **Гельд П. В., Сидоренко Ф. А.** Силициды переходных металлов четвертого периода. М.: Металлургия, 1971.

72. **Levinson L. M.**//J. Solid State Chem. 1973. Vol. 6. P. 126—135.

73. **Holseth H., Kjekshug A.**//J. Less-Common Metals. 1968. Vol. 16. P. 472—481.

74. **Boda G., Stenstrom B., Lugredo V. e. a.**//Phys. Ser. 1971. Vol. 4. P. 132—137.

75. **Miyahara S., Teranishi T.**//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 896—899.

76. **Shinoda D., Asanabe S. T.**//J. Phys. Soc. Japan. 1966. Vol. 21. P. 555—561.

77. **Nahigian H., Steger J., Mc Kinzie H. L. e. a.**// //Inorg. Chem. 1974. Vol. 13. P. 1498—1507.

78. **Heidelberg R. F., Luxem A. H., Talhouk S.**// //Inorg. Chem. 1966. Vol. 5. P. 194—198.

79. **Фролов А. А., Сидоренко Ф. А., Кренцис Р. П.**// //Тр. Уральского политехн. ин-та. 1970. Т. 186. С. 18—21.

80. **Yaccarino V., Wertheim G. K., Wernick J. R. e. a.**// Phys. Rev. 1967. Vol. 160. P. 476—489.

81. **Badger E. H. M., Griffith R. H., Newling W. B. S.**//Proc. Roy. Soc. 1949. Vol. A 197. P. [illegible]—193.

82. **Сидоренко Ф. А., Мирошников Л. А., Гельд П. В.**//Изв. вузов. Физика. 1969. № 5. С. 114—117.

83. **Czanderna A. W.**//J. Chem. Phys. 1966. Vol. 45. P. 3159—3167.

84. **Adou J. J., Baudet J.**//J. chim. phys. 1967. Vol. 64. P. 1540—1547.

85. **Gautier F., Krill G., Panissod P. e. a.**//J. Phys. C. 1974. Vol. 7. P. L170—L172.

86. **Klemm W., Schüth W.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1931. Bd. 203. S. 104—108.

87. **Bither T. A., Bouchard R. J., Cloud W. H. e. a.**// //Inorg. Chem. 1968. Vol. 7. P. 2208—2217.

88. **Mac Clure J. W., Marcus J. A.**//Phys. Rev. 1951. Vol. 84. P. 787—788.

89. **Зюбина Т. А., Торопцев В. П., Торопцев Ю. П. и др.**//Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1977. Т. 13. С. 355—357.

90. **Pankey T.**//J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31. P. 1802—1806.

91. **Рустамов П., Алиев О. М., Курбанов Т. Х. и др.**//Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1977. Т. 13. С. 1748—1751.

92. **Busch G. A. Kern R.**//Helv. Phys. Acta. 1959. Vol. 32. P. 24—57.

93. **Довлетов К., Мархуда Ю. А., Аникин А. В. и др.**//Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1978. Т. 14. С. 33—35.

94. **Van Itterbeek A., Duchateau W.**//Physica. 1956. Vol. 22. P. 649—656; 1957. Vol. 23. P. 169—172.

95. **Hedgcock F. T.**//J. Electronics. 1957. Vol. 2. P. 513—515.

96. **Bowes R.**//Phys. Rev. 1957. Vol. 108. P. 683—689.

97. **Stevens D. K., Cleland J., Grawford L. H. e. a.**// Ibid. 1955. Vol. 100. P. 1084—1093.

98. **Geist D.**//Z. Physik. 1959. Bd. 157. S. 335—361; 490—498.

99. **Bennett S., Heyding R. D.**//J. Phys. Chem. Solids. 1966. Vol. 27. P. 471—477.

100. **Badley B. G., Disalvo F. J., Warszczak J. V.**// Solid State Commun. 1972. Vol. 11. P. 89—91.

101. **Busch G., Risi M., Uuan S.**//Helv. phys. acta. 1960. Vol. 33. P. 1002—1013.

102. **Honda K., Ishiwara T.**//Sci. Repts Tôhoku Univ. 1915. Vol. 4. P. 215—260.

103. **Rao S. R., Sovithri K.**//Proc. Indian Sci. 1941. Vol. 14A. P. 584—592.

104. **De Monsabert W. R., Boudreaux E. A.**//Phys. Chem. 1958. Vol. 62. P. 1422—1428.

105. **Juza R., Rabenau A., Nitgshke J.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1964. Bd. 332. S. 1—9.

106. **Trzebiatowski W., Stalinski B.**//Bull. Acad. polon. sci. Cl. 1953. Vol. 1. P. 317—318.

107. **Горцева Ф. П., Дидченко Р.** Неорг. химия. 1965. Т. 4. С. 182—184.

108. **Khan H. R., Raub C. J., Gardner W. E. e. a.**// Mater. Res. Bull. 1974. Vol. 9. P. 1129—1130.

109. **Klemm W., Yacobi H., Tilk W.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1931. Bd. 201. S. 1—23.

110. **Fendins H.**//Dissert. Hannover, 1931.

111. **Morette A.**//Compt. rend. 1942. Vol. 215. P. 86—88.

112. **Nelson C. M., Boyd R. E., Smith Wm T.**//J. Amer. Chem. Soc. 1954. Vol. 76. P. 348—352.

113. **Fletcher J. M., Gardner W. R., Greenfield B. F. e. a.**//J. Chem. Soc. (A) 1968. Vol. 1968. P. 653—659.

114. **Fletcher J. M., Gardner W. E., Hooper E. W. e. a.**//Nature. 1963. Vol. 199. P. 1089—1095.

115. **Hoare F. E., Matthews J. C.**//Proc. Roy. Soc. 1952. Vol. A212. P. 137—148.

116. **Papatheodorou G. N.**//Inorg. Nucl. Chem. Lett. 1974. Vol. 10. P. 115—117.

117. **Garber M., Henry W. G., Hoeve H. G.**//Canad. J. Phys. 1960. Vol. 38. P. 1595—1603.
118. **Marcus J. A.**//Phys. Rev. 1949. Vol. 76. P. 413—416, 621—627.
119. **Mookherji T.**//J. Electrochem. Soc. 1970. Vol. 117. P. 1201—1204.
120. **Страхов Л. П., Римадханов К., Королев В. В.**//Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1973. Т. 9. С. 645—647.
121. **Singh S., Singh P.**//J. Phys. Chem. Sol. 1980. Vol. 41. P. 135—139.
122. **Пилат И. М.**//Физика металлов и металловедение. 1957. Т. 4. С. 232—238.
123. **Страхов Л. П., Крепкая В. П., Казеннов Б. А.**//Физика твердого тела. 1969. Т. 11. С. 3595—3597.
124. **Потыкевич И. В., Бондарь Г. И., Коваль В. С. и др.**//Укр. физ. журн. 1983. Т. 28. С. 1072—1076.
125. **Сирота Н. Н., Виткина Ц. З., Антюков А. М. и др.**// Изв. АН БССР. Сер. физ.-мат. 1976. № 2. С. 126—128.
126. **Verharghe H., Vandermeerssche G., Le Conepte C.**//Phys. Rev. 1959. Vol. 80. P. 758—764.
127. **Александров Б. Н., Веркин Б. И., Свечкарев И. В.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1960. Т. 39. С. 37—40.
128. **Busch G., Menth A., Natterer B.**//Z. Naturforsch. 1964. Bd. 19a, S. 542—551.
129. **Juza R., Hahn H.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1940. Bd. 244. S. 111—124.
130. **Busch G., Kern R.**//Helv. phys. acta. 1959. Vol. 32. P. 24—29.
131. **Stevens D. K., Crawford J. H.**//Phys. Rev. 1955. Vol. 99. P. 487—488.
132. **Darnell A. J., Libby W. F.**// Ibid. 1964. Vol. A135. P. 1453—1459.
133. **Broniewski W., Franczek S., Witkowski R.**// //Ann. Phys. 1938. Vol. 10. P. 5—19.
134. **Endô H.**//Sci. Repts. Tôhoku Univ. 1927. Vol. 16. P. 201—234.
135. **Matyás M.**//Czechoslov. J. Phys. 1958. Vol. 8. P. 301—308.
136. **De Haas W. J., van Alphen P. M.**//Acad. Sci. (Amsterdam). 1933. Vol. 36. P. 158—169.
137. **Rao S. R., Venkataramiah H. S.**//J. Mysore Univ. B. 1948. Vol. 8, № 2. P. 39—46.
138. **Lane C. T.**//Phys. Rev. 1933. Vol. 44. P. 43—45.
139. **Lock J. M.**//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1957. Vol. B70. P. 476—479, 566—571.
140. **Klemm W., Meisel K., von Vogel H.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1930. Bd 190. S. 123—144.
141. **Kreissman C. J., McCuire T. R.**//Phys. Rev. 1955. Vol. 98. P. 936—937.
142. **Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.**//Физика металлов и металловедение. 1964. Т. 18. С. 784—788.
143. **Hall J. R., Marchunt N. K., Plowman R. A.**// Australian J. Chemie. 1963. Vol. 16. P. 34—38.
144. **Schäfer H., Gerken R., Scholz H.**//Z. anorgan. and allgem. Chem. 1965. Bd. 335. S. 96—103.
145. **Brauer G., Weidlein J., Strähle J.**//Ibid. 1966. Vol. 348. P. 298—307.
146. **Крылов Е. И.**//Журн. неорг. химии. 1958. Т. 3. С. 1487—1489.
147. **McCarley R. E., Brown T. M.**//Inorg. Chem. 1964. Vol. 3. P. 1232—1236.
148. **Fendins H.**//Dissert., Hannover, 1931.
149. **Gibart P.**//Compt. rend. 1964. Vol. 259. P. 4237—4241.
150. **Biltz W.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1930. Bd. 214. S. 227—236.
151. **Greiner J. D., Shanks H. R.**//J. Solid State Chem. 1972. Vol. 5. P. 262—266.
152. **Cheretien A., Odent G.**//Compt. rend. 1963. Vol. 257. P. 2290—2295.
153. **Thaore K.**//Bull. Soc. chim. France. 1965. P. 1284.
154. **Белова В. И., Семенов И. Н.**//Журн. неорг. химии, 1971, Т. 16. С. 2871—2875.
155. **Machmer P.**//Z. Naturforsch. 1969. Vol. 24B. P. 200—208.
156. **Schüber H., Huneke K. H., Brendel C.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1971. Bd. 383. S. 49—56.
157. **Белова В. И. Сыркин Ю. К.**//Журн. неорг. химии, 1958. Т. 3. С. 2016—2021.
158. **Колбин Н. И., Самойлов В. М.**//Журн. неорг. химии, 1968, Т. 13. С. 906—909.
159. **Brodersen K., Machmer P.**//Naturforsch. 1962. Bd. 176. S. 127—133.
160. **Ryden W. D., Lawson A. W.**//J. Chem. Phys. 1970, Vol. 52. P. 6058—6064.
161. **Gouthrie A. N., Bourland L. T.**//Phys. Rev. 1931. Vol. 37. P. 303—308.
162. **Brodersen K., Thiele G., Schnering H. G.**// //Z. anorgan. und allgem. Chem. 1965. Bd. 337. S. 120—128.
163. **Argue G. R., Banewicz J. J.**//Inorg. Nucl. Chem. 1963. Vol. 25. P. 923—927.
164. **Gronvold F., Haraldsen H., Kjikshus A.**//Acta Chem. Scand. 1960. Vol. 14. P. 1879—1886.
165. **Rao S. R., Sriraman S.**//Proc. Indian Acad. Sci. 1937. Vol. 5A. P. 343—350.
166. **Vogt E.**//Ann. Phys. 1932. Bd. 14. S. 1—39.
167. **Bates L. F., Baker C. I. W.**//Proc. Phys. Soc. (Lond.) 1938. Vol. 50. P. 409—412.
168. **Rao S. R., Narayanaswamy A. S.**//Philos. Mag. 1938. Vol. 26. P. 1018—1030.
169. **Pascal P., Minne P.**//Compt. rend. 1931. Vol. 193. P. 1303—1305.
170. **Mikhail H., Mekkawy J.**// Czech. J. Phys. 1978. Vol. B28. P. 216—222.
171. **Shoenberg D., Uddin M. Z.**//Proc. Roy. Soc. 1936. Vol. A156. P. 687—701.
172. **Kapitza P.**//Proc. Roy. Soc. 1931. Vol. A131. P. 224—273.
173. **Rao S. R. J.**//J. Mgsore Univ. B. 1945. Vol. 5. № 2. P. 69—77.
174. **Smith J. F., Greiner J. D.**//Phys. Rev. 1959. Vol. 115. P. 884—891.
175. **Trzebiatowski W., Selwood P. W.**//J. Amer. Chem. Soc. 1950. Vol. 72. P. 4501—4506.
176. **Bates L. F., Hughes D.**//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1954. Vol. B67. P. 28—37.
177. **Henkel P., Klemm W.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1935. Bd. 222. S. 70—72.
178. **Picon M., Flahaut J.**//Compt. rend. 1953. Vol. 237. P. 1160—1162.
179. **Picon M., Flahaut J.**//Ibid. 1955. Vol. 240. P. 784—785.
180. **Khodadad P.**//Ibid. 1958. Vol. 247. P. 1205—1209.
181. **Brodsky M. B.**//Inst. Phys. Lond. 1971. Conference Didest Rare Earth and Actinides. № 3. P. 75—83.
182. **Seguin M.**//Ibid. 1958. Vol. 246. P. 3243—3246.
183. **Гречнев Г. Е., Свечкарев И. В., Середа Ю. П.**// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1978. Т. 75. С. 993—998.
184. **Landolt-Börhstein,** Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. New Series. Group III. Vol. 17e. P. 284.
185. **Landolt-Börnstein,** Zahlenwerte und Funktionen. Ed. 6-th, 1962. Bd. II, 9 teil.
186. **Böhm B., Klemm W.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1939. Bd. 243. S. 69—85.
187. **Marchand A.**//Compt. rend. 1955. Vol. 241. P. 468—470.

188. **Yamaguchi Y.**//Solid State Commun. 1970. Vol. 8. P. 833—835.
189. **Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В., Щеголихина Н. И.**//Физика металлов и металловедение. 1968. Т. 25. С. 180—185.
190. **Browne S. H., Lane C. T.**//Phys. Rev. 1941. Vol. 60. P. 895—899.
191. **Klemm W., Hoschek E.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1936. Bd. 226. S. 359—369.
192. **Clark J. K., Machin D. J.**//J. Chem. Soc. 1963. P. 4430—4437.
193. **Nyholm R .S., Sharpe A. G.**//J. Chem. Soc. 1952. P. 3579—3587.
194. **Juza D., Giegling D., Schäber H.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1969. Bd. 366. S. 121—130.
195. **Воробьев Н. И., Печковский В. В., Кобец Л. В.**//Журн. неорг. химии. 1974. Т. 19. С. 3—6.
196. **Cadeville M. C.**//J. Phys. Chem. Sol. 1966. Vol. 27. P. 667—674.
197. **Проскурников А. А., Крылов Е. И.**//Журн. неорг. химии. 1965. Т. 10. С. 1017—1021.
198. **Hume D. N., Stone H. W.**//J. Amer. Chem. Soc. 1941. Vol. 63. P. 1200—1209.
199. **Hoppe R., Daehne W., Klemm W.**//Ann. Chem. 1962. Vol. 658. P. 1—14.
200. **Zernicke J.**//Rec. Trav. Chim. 1953. Vol. 72. P. 390—397.
201. **Williams E. H.**//Phys. Rev. 1926. Vol. 28. P. 167—173.
202. **Haraldsen H., Grönvold F., Hurlen T.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1956. Bd. 283. S. 143—164.
203. **Furuseth S., Kjekshus A., Andersen A. F.**//Acta Chem. Scand. 1969. Vol. 23. P. 2325—2329.
204. **Vandenbempt E., Pauwels L., de Clippeleir K.**//Bull. Soc. Chim. Belg. 1981. Vol. 80. P. 283.
205. **Uchida E., Kondoh H.**//J. Phys. Soc. Japan. 1955. Vol. 11. P. 21—28.
206. **Munson R. A., de Sorbo W., Koubel J. S.**//J. Chem. Phys. 1967. Vol. 47. P. 1769—1784.
207. **Lewig J., Machin D. J., Newnham I. E. e. a.**//J. Chem. Soc. 1962. № 11. P. 2036—2044.
208. **Ehrlich P., Plöger F., Pietzka G.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1955. Vol. 282. S. 19—27.
209. **Rüdolf W., Luginsland H. H.**//Ibid. 1964. Bd. 334. S. 125—138.
210. **Klemm W., Steinberg H.**//Ibid. 1936. Bd. 227. S. 193—213.
211. **Schäfer H., v. Schnering H. G., Tillack J.**//Ibid. 1967. Bd. 353. S. 281—297
212. **Kepert D. L., Mandyszewshy R.**//Inorg. Chem. 1968. Vol. 7. P. 2091—2098.
213. **Knox K., Coffey G. E.**//J. Amer. Chem. Soc. 1959. Vol. 81. P. 5—13.
214. **Holloway J. H., Peacock R. D.**//J. Chem. Soc. 1963. P. 3892—3898.
215. **Тейлор К., Дарби М.** //Физика редкоземельных соединений/Пер. с англ. М.: Мир. 1974.
216. **Brown D. A., Glass W. K., O'Daly C.**//J. Chem. Soc. Dalton. Trans. 1973. № 12. P. 1311—1315.
217. **Brisdon B. L., Edwards D. A., Machin D. J.**//J. Chem. Soc. (A). 1967. P. 1825—1829.
218. **Perakis N.**//J. Phys. Radium. 1954. Vol. 15. P. 191.
219. **Brown D., Colton R.**//J. Chem. Soc. 1964. P. 714—717.
220. **Schüth W., Klemm W.**//Z. anorgan. und allgem. Chem. 1934. Bd. 220. S. 193—198.
221. **Colton R., Farthing R .H.**//Australian J. Chem. 1968. Vol. 21. P. 589—597.
222. **Hargreaves G. B., Peacock R. D.**//J. Chem. Soc. 1960. № 11. P. 2618—2626.
223. **Hargreaves G. B., Peacock R. D.**//Proc. Chem. Soc. 1959. № 1. P. 85—89.
224. **Glemser O., Roesky H. W., Hellberg K. H. e. a.**//Chem. Ber. 1966. Bd. 99. S. 2652—2663.
225. **Bose D. M., Bhar H. G.**//Z. Physik. 1928. Bd. 48. S. 716—721.
226. **Figgis B. N., Lewis J., Mabbs F. E.**//J. Chem. Soc. 1961. P. 3138—3147.
227. **Nast R., Hoerl W.**//Chem. Ber. 1962. Bd. 95. S. 1470—1475.

Глава 27

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

К. Г. Гуртовой

27.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Вещества, обладающие спонтанным магнитным моментом, т. е. имеющие конечную намагниченность при достаточно низкой температуре и нулевом внешнем магнитном поле, называются ферромагнетиками в широком смысле слова. При этом упорядочение спиновых и орбитальных моментов электронов в этих веществах не обязательно имеет простой характер (см. структуры «Конус» и «Ферри» на рис. 27.16). Для ферромагнетиков характерны зависимости магнитной проницаемости от внешнего магнитного поля и предыстории образца, а также существование температуры, выше которой вещество переходит в парамагнитное состояние с нулевым спонтанным магнитным моментом.

Намагниченность и магнитная индукция. Магнитный момент единицы объема магнетика называют намагниченностью. Намагниченность **J**, А/м, магнитная индукция **B**, Тл, и напряженность магнитного поля **H**, А/м, связаны известным соотношением:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{J}),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Если эллипсоидальный образец магнетика находится во внешнем магнитном поле **H**, то поле внутри образца $\mathbf{H}_i$ определяется формулой

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{H} - \hat{N}\,\mathbf{J},$$

где $\hat{N}$ — тензор размагничивающих коэффициентов (факторов).

В ферромагнетиках намагничивание из состояния с нулевой индукцией изображается кривой намагничивания OA (или OA') (рис. 27.1), описывающей зависимость магнитной индукции (или намагниченности) от H. Намагниченность с ростом поля достигает предела J_s, называемого намагниченностью насыщения. При перемагничивании зависимость $B(H)$ [или $J(H)$] образует характерную S-образную кривую — петлю гистерезиса

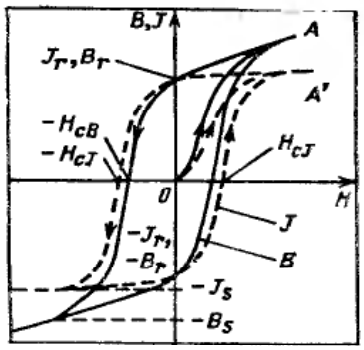


Рис. 27.1. Зависимости магнитной индукции B и намагниченности J ферромагнитного материала от напряженности поля H

(рис. 27.1). Точки пересечения петли гистерезиса с осями ординат и абсцисс дают значения соответственно остаточной индукции B_r (или остаточной намагниченности J_r) и коэрцитивной силы H_{cB} (или H_{cJ}).

Часто для описания магнетиков используют удельный магнитный момент (иначе удельную намагниченность) σ, т. е. магнитный момент единицы массы. Единица удельного магнитного момента в СИ — А·м²/кг, в системе СГСМ — Гс·см³/г (в англоязычной литературе — emu/g). Иногда в качестве магнитной характеристики приводят атомный магнитный момент n, т. е. средний магнитный момент, приходящийся на атом или на формульную единицу вещества; его измеряют в магнетонах Бора μ_B. Удельный и атомный магнитные моменты связаны с соотношением

$$n = (M/N_A\ \mu_B)\,\sigma,$$

где M — молярная масса, соответствующая формульной единице вещества, кг·моль$^{-1}$; N_A — постоянная Авогадро, моль$^{-1}$.

Точка Кюри и точка компенсации. Температура T_C, при которой магнетик переходит из ферромагнитного в парамагнитное состояние, называется температурой или точкой Кюри. В некоторых интерметаллидах со сложной магнитной структурой при так называемой температуре компенсации $T_{комп}$ спонтанная намагниченность обращается в нуль вследствие компенсации составляющих ее намагниченностей магнитных подрешеток.

Магнитная восприимчивость и проницаемость. Зависимость J от H представляется в виде $J=\chi H$, где χ — магнитная восприимчивость (объемная), а зависимость B от H принято записывать в виде $B=\mu_a H$, где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м. Таким образом, восприимчивость и проницаемость связаны соотношением

$$\chi = (\mu_a/\mu_0) - 1 = \mu_r - 1,$$

где $\mu_r=\mu_a/\mu_0$ — относительная магнитная проницаемость вещества. Дифференцирование индукции по полю дает относительную дифференциальную магнитную проницаемость

$$\mu_{rd} = (1/\mu_0)\,(dB/dH).$$

Эта величина в слабых полях носит название относительной начальной проницаемости, а максимальное ее значение на всей кривой намагничивания — относительной максимальной проницаемости.

При температурах $T>T_C$ парамагнитная восприимчивость многих магнетиков достаточно хорошо описывается законом Кюри — Вейсса

$$\chi = C/(T - \Theta_p),$$

где $C=\mu_0(N_A/V)\mu^2_{эф}/3k$; Θ_p — парамагнитная температура Кюри, К. Здесь V — молярный объем, м³/моль; $\mu_{эф}$ — эффективный атомный магнитный момент, А·м²; k — постоянная Больцмана.

Кроме определенной выше магнитной восприимчивости единицы объема χ, часто используют удельную восприимчивость χ_ρ и молярную восприимчивость χ_m, т. е. восприимчивости в расчете на единицу массы или моль вещества. Эти величины связаны между собой формулами

$$\chi_\rho = \chi/\rho \text{ и } \chi_m = \chi_\rho\, M,$$

где ρ — плотность, кг/м³.

В СИ и системе СГСМ объемная восприимчивость — безразмерная величина, удельная восприимчивость выражается в м³/кг и см³/г (в англоязычной литературе — в emu/g), а молярная восприимчивость — в м³/моль и см³/моль (в англоязычной литературе — в emu/mol).

Единица абсолютной магнитной проницаемости в СИ — Гн/м. В системе СГСМ магнитная проницаемость μ, определяемая формулой $B=\mu H$, безразмерна (как и относительная проницаемость в СИ).

Магнитная анизотропия. Различие магнитных свойств ферромагнетика вдоль неэквивалентных направлений в теле, называемое магнитной анизотропией, наиболее выражено в монокристаллах. Мерой магнитной анизотропии является работа намагничивания, необходимая для поворота вектора **J** из положения вдоль оси легкого намагничивания, вдоль которой этот вектор направлен в отсутствие поля, в новое положение — вдоль внешнего поля. Эта работа определяет плотность свободной энергии магнитной анизотропии E_a, Дж/м³, которая следующим образом выражается через углы между вектором намагниченности **J** и кристаллографическими осями:

1) для кубических кристаллов

$$E_a = K_1 s + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + K_3 s^2 + \ldots,$$

где α_1, α_2 и α_3 — направляющие косинусы вектора **J**; $s = \alpha_1^2\,\alpha_2^2 + \alpha_1^2\,\alpha_3^2 + \alpha_2^2\,\alpha_3^2$;

2) для гексагональных кристаллов

$$E_a = K_1 \sin^2\vartheta + K_2 \sin^4\vartheta + \ldots,$$

где ϑ — угол между вектором **J** и гексагональной осью c.

Магнитострикция. Изменение размеров и формы тела при его намагничивании называют магнитострикцией. Различают объемную магнитострикцию, характеризуемую относительным изменением объема тела $\omega=\Delta V/V$, и анизотропную магнитострикцию, характеризуемую относительным изменением размеров тела $\lambda=\Delta l/l$ почти без изменения его объема. Иногда этот вид магнитострикции не совсем точно называют линейной магнитострикцией.

Магнитострикция насыщения, т. е. магнитострикция, возникающая при намагничивании кристалла до насыщения, для кубических кристаллов определяется формулой

$$\lambda = h_1\left(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - 1/3\right) +$$
$$+ 2h_2\left(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_1\alpha_3\beta_1\beta_3 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3\right) +$$
$$+ h_4\left(\alpha_1^4\beta_1^2 + \alpha_2^4\beta_2^2 + \alpha_3^4\beta_3^2 - (2/3)\,s - 1/3\right) +$$
$$+ 2h_5\left(\alpha_1^2\alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_1\alpha_2^2\alpha_3\beta_1\beta_3 + \alpha_1\alpha_2\alpha_3^2\beta_1\beta_2\right) + \ldots + A,$$

где α_i и β_i — направляющие косинусы вектора **J** и

вектора, вдоль которого производится измерение магнитострикции; $A=h_3 s$, если направление легкого намагничивания — ось [100]; $A=h_3$ ($s=1/3$), если направление легкого намагничивания — ось [111].

Продольная ($\alpha_i=\beta_i$) магнитострикция вдоль главных кристаллографических осей кубического кристалла определяется формулами

$$\lambda_{100}=(2/3)(h_1+h_4),\ \lambda_{110}=(1/12)(2h_1+6h_2+h_4),$$
$$\lambda_{111}=(2/9)(3h_2+h_5).$$

Часто можно положить $h_3=h_4=h_5=0$ и пользоваться упрощенной формулой

$$\lambda=(3/2)\lambda_{100}(s-1/3)+3\lambda_{111}(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2+$$
$$+\alpha_1\alpha_3\beta_1\beta_3+\alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3).$$

Для поликристаллического материала анизотропную магнитострикцию можно получить из соотношения

$$\lambda=(3/2)\lambda_s(\cos^2\vartheta-1/3),$$

где $\lambda_s=(2\lambda_{100}+3\lambda_{111})/5$, а ϑ — угол между вектором **J** и направлением измерения.

Магнитострикция насыщения гексагональных кристаллов описывается выражением

$$\lambda=\lambda_A\left[(\alpha_1\beta_1+\alpha_2\beta_2)^2-(\alpha_1\beta_1+\alpha_2\beta_2)\alpha_3\beta_3\right]+$$
$$+\lambda_B\left[\left(1-\alpha_3^2\right)\left(1-\beta_3^2\right)-(\alpha_1\beta_1+\alpha_2\beta_2)^2\right]+$$
$$+\lambda_C\left[\left(1-\alpha_3^2\right)\beta_3^2-(\alpha_1\beta_1+\alpha_2\beta_2)\alpha_3\beta_3\right]+$$
$$+4\lambda_D(\alpha_1\beta_1+\alpha_2\beta_2)\alpha_3\beta_3.$$

Направляющие косинусы α_i, β_i относятся к системе прямоугольных координат, где оси 1(x) и 2(y) совпадают с направлением a и b, а ось 3 (z) — с гексагональной осью c (см. рис. 27.35).

Для поликристаллического материала продольная магнитострикция насыщения может быть получена по формуле

$$\lambda_{\parallel}=(2/5)\lambda_A+(8/15)\lambda_D.$$

Поперечная магнитострикция насыщения (т. е. магнитострикция, измеряемая в направлении, перпендикулярном **J**) выражается формулой

$$\lambda_{\perp}=(2/15)\lambda_A+(1/3)(\lambda_B+\lambda_C)-(4/15)\lambda_D.$$

Для гексагональных кристаллов редкоземельных металлов (см. рис. 27.32—27.34) применяют отличные от приведенного выше выражения для магнитострикции насыщения

$$\lambda=\left[\lambda_1^{\alpha,0}+\lambda_1^{\alpha,2}\left(\alpha_3^2-1/3\right)\right]\left(\beta_1^2+\beta_2^2\right)+$$
$$+\left[\lambda_2^{\alpha,0}+\lambda_2^{\alpha,2}\left(\alpha_3^2-1/3\right)\right]\beta_3^2+$$
$$+\frac{1}{2}\lambda^{\gamma,2}\left[(\alpha_1\beta_1+\alpha_2\beta_2)^2-(\alpha_1\beta_2-\alpha_2\beta_1)^2\right]+$$
$$+2\lambda^{\varepsilon,2}\left(\alpha_1\beta_1+\alpha_2\beta_2\right)\alpha_3\beta_3$$

или

$$\lambda=A\left[2\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2+\left(\alpha_1^2-\alpha_2^2\right)\beta_2\right]^2+$$
$$+B\alpha_3^2\left[(\alpha_1\beta_1+\alpha_2\beta_2)^2-(\alpha_1\beta_2-\alpha_2\beta_1)^2\right]+$$
$$+C\left[(\alpha_1\beta_1+\alpha_2\beta_2)^2-(\alpha_1\beta_2-\alpha_2\beta_1)^2\right]+$$
$$+D\left(1-\alpha_3^2\right)\left(1-\beta_3^2\right)+E\alpha_3^2\beta_3^2\left(1-\alpha_3^2\right)+$$
$$+F\alpha_3^2\left(1-\alpha_3^2\right)+G\beta_3^2\left(1-\alpha_3^2\right)+H\alpha_3\beta_3(\alpha_1\beta_1+\alpha_2\beta_2)+$$
$$+I\alpha_3\beta_3^2\left(\alpha_1\beta_1+\alpha_2\beta_2\right)+J\alpha_3^2\left(1-\beta_3^2\right)+K\alpha_3^2\beta_3^2.$$

(Иногда обозначают $C=\lambda^{\gamma,2}/2$, $A=-\lambda^{\varepsilon,4}$.)

Магнитомягкие материалы. Магнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях напряженностью $H\sim 10\div 10^3$ А/м, относятся к магнитомягким. Для этих материалов характерны высокие значения относительной магнитной проницаемости — начальной $\mu_{r\,нач}=\sim 10^2\div 10^5$ и максимальной $\mu_{r\,max}\sim 10^3\div 10^6$. Коэрцитивная сила H_c магнитомягких материалов составляет обычно от 1 до 10^2 А/м, а потери на магнитный гистерезис очень малы — $1-10^4$ Дж/м^3 на один цикл перемагничивания. Для многих материалов в качестве справочной характеристики приводят удельные потери, т. е мощность потерь P, на частотах перемагничивающего поля 50 или 400 Гц при различных значениях амплитуды индукции (например, $P_{1,0/50}$ — мощность потерь на частоте 50 Гц при индукции, равной 1,0 Тл).

Магнитострикционные материалы. Основными характеристиками магнитострикционных материалов (см. табл. 27.32), применяющихся для изготовления магнитострикционных преобразователей, являются: коэффициент магнитомеханической связи K, квадрат которого равен отношению преобразованной энергии (механической или магнитной) к подводимой (соответственно магнитной или механической), динамическая магнитострикционная постоянная $a=(\partial\sigma/\partial B)_\varepsilon$ и магнитострикционная постоянная чувствительности $\Lambda=(\partial B/\sigma)_H$, где σ — механическое напряжение, Н/м^2, B — магнитная индукция, Тл, а индексы ε и H означают неизменность деформации и магнитного поля. Величина a существенна для работы излучателей, а Λ — для работы приемников. Плотность ρ и модуль Юнга E определяют резонансную частоту преобразователей; от механической прочности, магнитострикции насыщения λ_s и индукции насыщения B_s зависит предельная интенсивность магнитострикционных излучателей; механическая добротность Q, удельное электрическое сопротивление $\rho_{эл}$ и коэрцитивная сила H_c определяют потери энергии на вихревые токи и гистерезис при работе преобразователя. Значения K, a, Λ существенно зависят от напряженности подмагничивающего поля, значение которого $H_{опт}$, отвечающее максимуму K, обычно называют оптимальным.

Магнитотвердые материалы. К магнитотвердым относятся материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряженностью $H\sim 10^3\div 10^5$ А/м. Магнитотвердые материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы H_c, остаточной индукции B_r и максимальной плотности магнитной энергии $(BH)_{max}$ на участке B_r-H_{cB} размагничивания петли гистерезиса (рис. 27.1).

В § 27.1 и 27.3 в каждом из пунктов, объединяющих ту или иную группу металлических ферромагнетиков, сначала приводятся температурные зависимости парамагнитной восприимчивости, зависимости намагниченности, удельного или атомного магнитного моментов от температуры, магнитного поля, состава сплавов и зависимости температур Кюри сплавов от их состава. Затем идут данные по магнитной анизотропии и, наконец, по магнитострикции.

При отборе материала не ставилась задача достичь всеобъемлющей полноты, а делалась попытка отразить современное состояние и тенденции развития физики

магнитных явлений. В главе дается также информация как о наиболее распространенных отечественных технических магнитных материалах, так и о перспективных материалах, едва вышедших за пределы лабораторий.

Наиболее полные сведения о магнитных свойствах ферромагнитных металлов и сплавов можно найти в монографиях [3, 4, 59]. Свойства металлических ферромагнитных материалов описаны в учебнике [25] и справочниках [26—28].

27.2. ЭЛЕМЕНТЫ

27.2.1. Железо, кобальт, никель. Среди переходных d-металлов ферромагнитны только Fe, Co и Ni (3 d-металлы), составляющие основу почти всех магнитных материалов. В табл. 27.1 — 27.5 и на рис. 27.2—27.15 содержатся сведения об их магнитных свойствах. Обзор магнитных свойств этих металлов дан в [110].

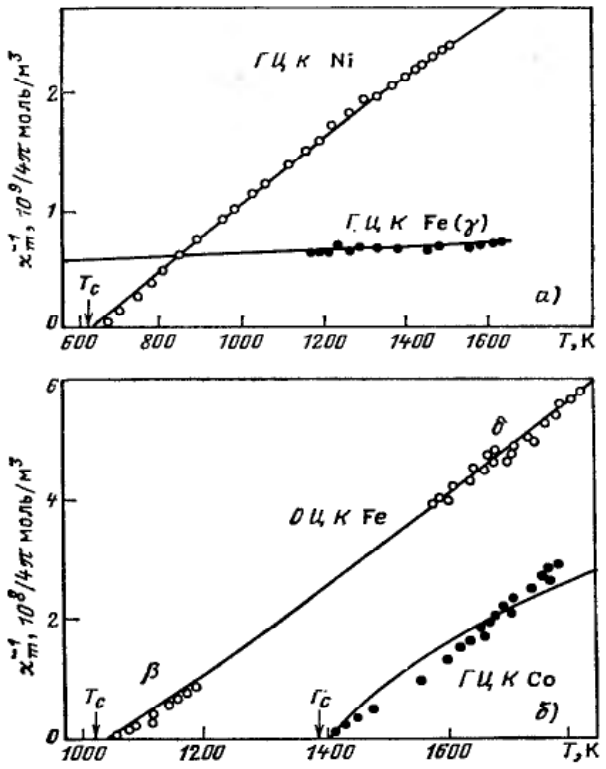


Рис. 27.2. Температурные зависимости обратной молярной парамагнитной восприимчивости для гранецентрированного кубического Ni [31] и гранецентрированной кубической γ-фазы Fe (*а*), а также для объемноцентрированных кубических β- и δ-фаз Fe и гранецентрированной кубической фазы Co (*б*) [91]

Таблица 27.2. **Зависимости относительной намагниченности J_s/J_0 для Fe, Co и Ni от относительной температуры T/T_C** [30]

T/T_C	Fe	Co, Ni	T/T_C	Fe	Co, Ni
0	1	1	0,7	0,85	0,83
0,1	0,996	0,996*	0,8	0,77	0,73
0,2	0,99	0,99	0,85	0,70	0,66
0,3	0,975	0,98	0,90	0,61	0,56
0,4	0,95	0,96	0,95	0,46	0,40
0,5	0,93	0,94	1	0	0
0,6	0,90	0,90			

* Только для Ni.

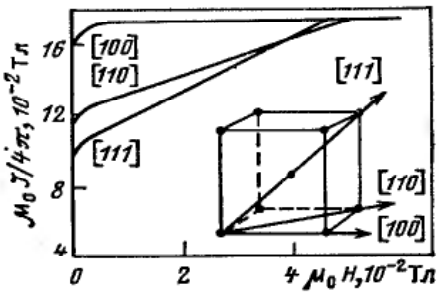


Рис. 27.3. Кривые намагничивания для основных кристаллографических направлений монокристалла Fe при $T=20$°C [67]

Таблица 27.1. **Основные магнитные свойства Fe, Co, Ni**

Элемент	σ_0, А · м²/кг	n, μ_B	T_C, К	σ_s (4,2 К), А · м²/кг	σ_s (287 К), А · м²/кг	Литература
Fe	221,71 (0,08)	2,216 2,226	1044 (2)	222,671	218,210	[55] [94]
Co*	162,55	1,715 1,729 (**H** ∥ *c*) 1,721 (**H** ∥ [100] в базисной плоскости)	1388 (2)	163,862 (**H** ∥ *c*) 163,078 (**H** ∥ [100] в базисной плоскости)	162,624	[90] [94]
Ni	58,57 (0,03)	0,616 0,619	627,4 (0,3)	58,872	55,370	[55] [94]

* В области температур около 700 К в Co происходит переход из гексагональной плотноупакованной (ГПУ) α-фазы, устойчивой при низких температурах, в гранецентрированную кубическую (ГЦК) β-фазу, устойчивую при высоких температурах [110].

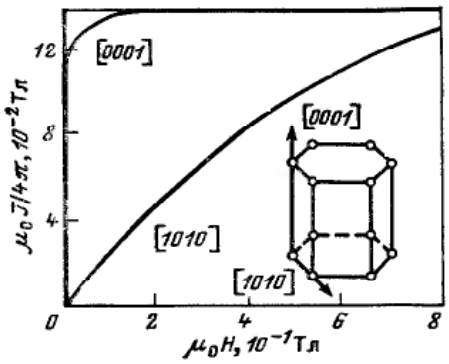


Рис. 27.4. Кривые намагничивания для основных кристаллографических направлений монокристалла Co при $T=20$°C [74]

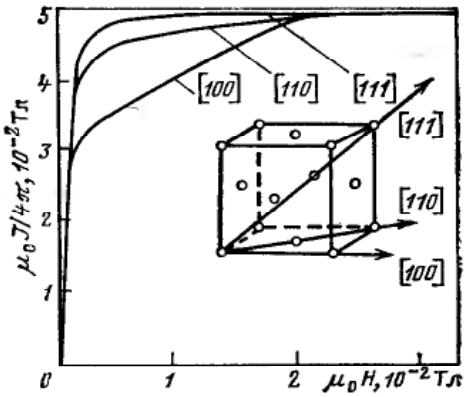


Рис. 27.5. Кривые намагничивания для основных кристаллографических направлений монокристалла Ni при $T=20$ °C [73]

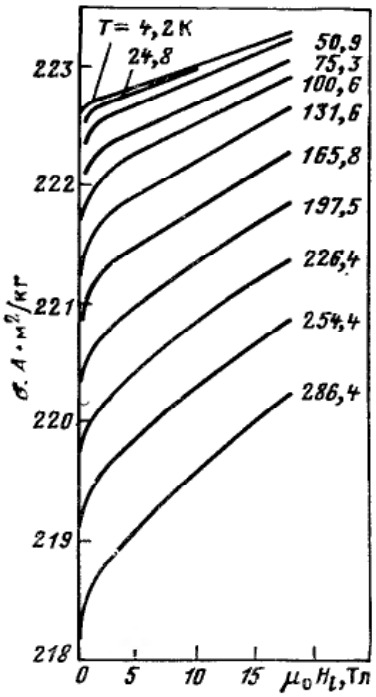


Рис. 27.6. Кривые намагничивания кристалла Fe в сильных магнитных полях при различных температурах. Намагниченности вдоль осей [100], [110] и [111] различаются здесь менее чем на 0,05%. Кривые проведены по средним значениям этих намагниченностей; $\mu_0 H_i$ — индукция внутреннего магнитного поля [94]

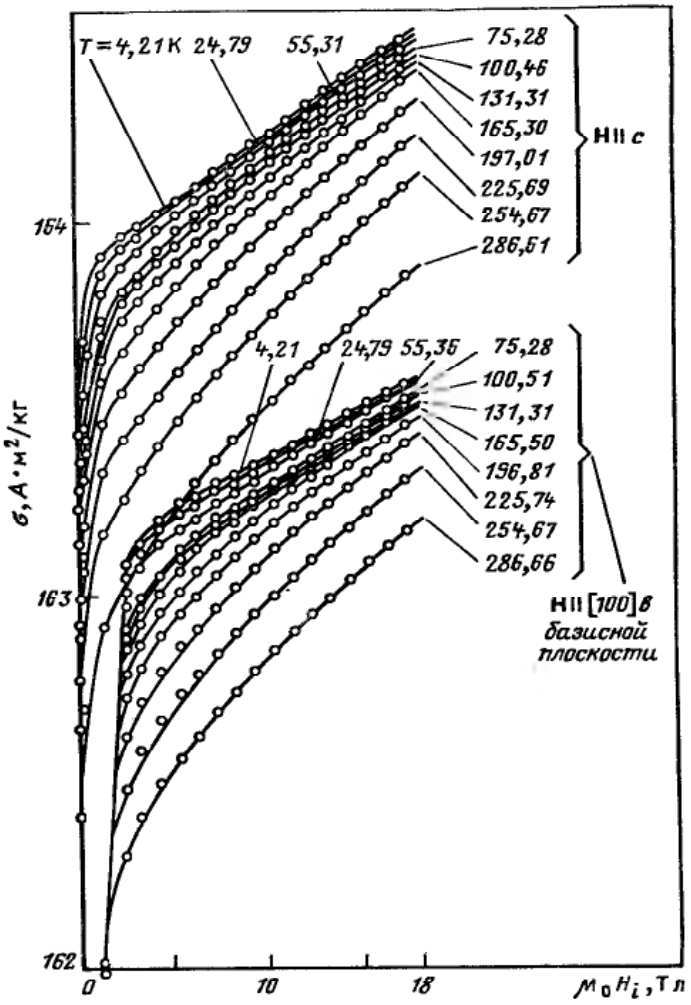


Рис. 27.7. Кривые намагничивания гексагонального кристалла Co в сильных магнитных полях при различных температурах; H_i, H — внутреннее и внешнее магнитные поля, c — гексагональная ось [94]

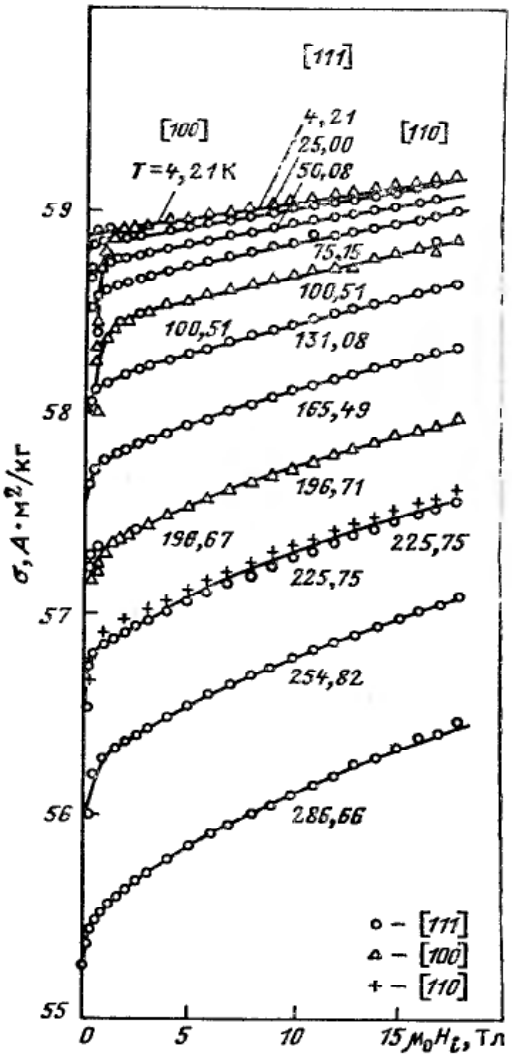


Рис. 27.8. Кривые намагничивания кристалла Ni в сильных магнитных полях при различных температурах, $\mu_0 H_i$ — индукция внутреннего магнитного поля [94]

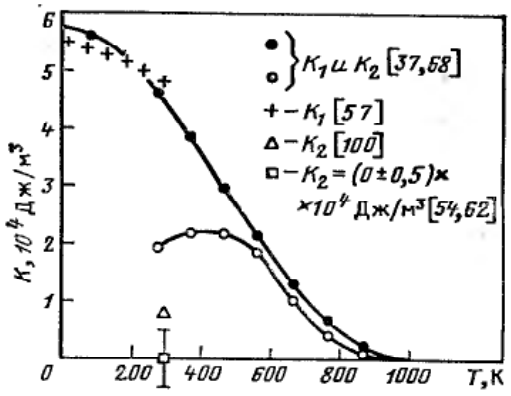


Рис. 27.9. Температурные зависимости констант магнитной анизотропии Fe

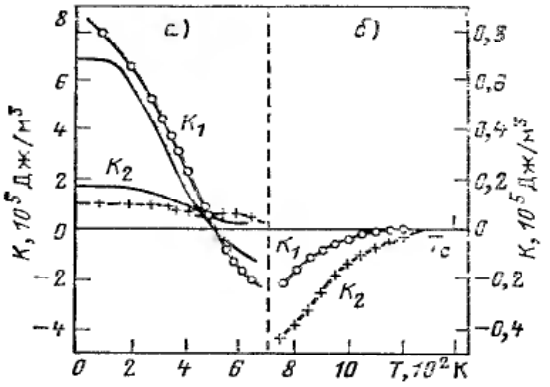
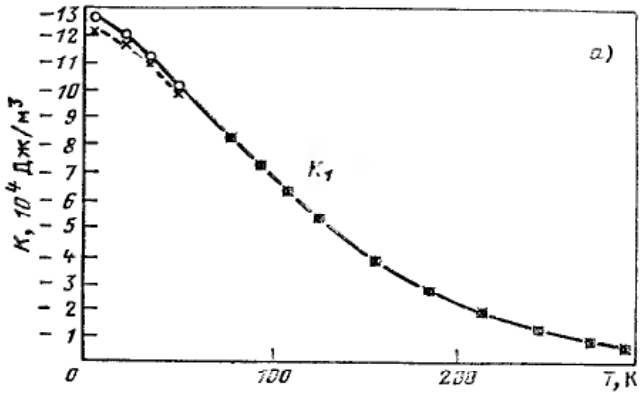


Рис. 27.10. Температурные зависимости констант магнитной анизотропии Co для гексагональной (*а*) и кубической гранецентрированной (*б*) фаз:
кривые с экспериментальными точками — данные [69, 104], кривые без экспериментальных точек — данные [33]



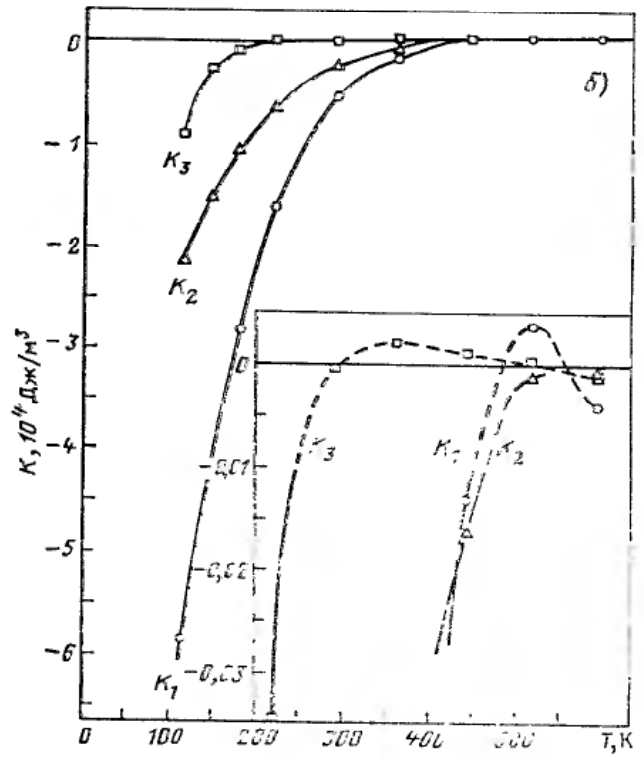


Рис. 27.11. Температурные зависимости констант магнитокристаллографической анизотропии Ni из [57] (*а*, кружки — первая работа [57], крестики — вторая) и [32] (*б*)

Таблица 27.3. **Производная $(1/\mu_0)(\partial\omega/\partial H)_T$ для элементов группы железа**

Вещество	T, К	$\frac{1}{\mu_0}\left(\frac{\partial\omega}{\partial H}\right)$, 10^{-6} Тл$^{-1}$	Литература
Fe	1,5	4,5	[102]
	77	4,5	[102]
	293	4,5—6	[77, 102]
β-Co, ГЦК*	4,2	4,8	[101]
	293	5	[102]
α-Co, ГПУ*	4,2	3,2	[101]
		7,2	[110]
	293	6	[39]
Ni	4,2	1,2	[105]
	77	1,5	
	294	1,0	
	377	0,5	
	428	0,0	
	479	—0,7	
	568	—3,8	
	606	—11,0	

* См. примеч. к табл. 27.1.

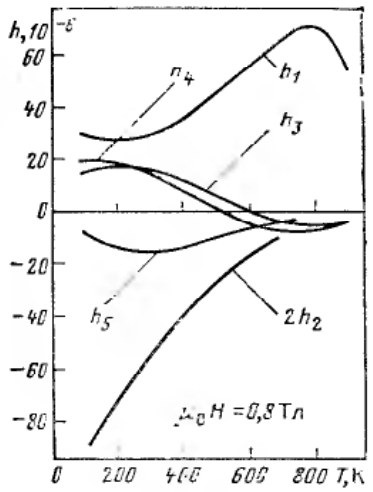


Рис. 27.12. Температурные зависимости констант магнитострикции Fe [109]

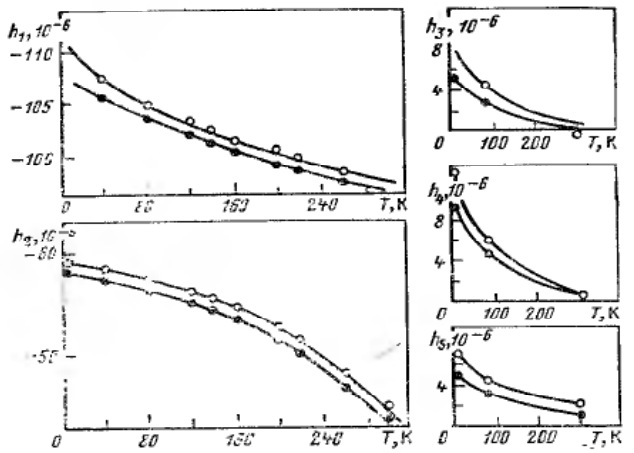


Рис. 27.13. Температурные зависимости констант магнитострикции двух образцов Ni (черные и белые кружки) [78]

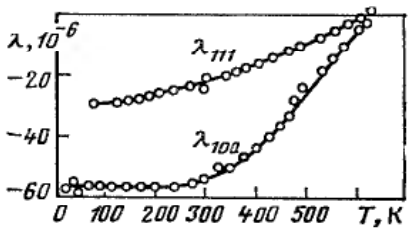


Рис. 27.14. Температурные зависимости магнитострикции λ_{100} и λ_{111} Ni [77]

Таблица 27.4. **Константы магнитострикции, 10^{-6}, Fe и Ni при комнатной температуре**

Элемент	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	Литература
Fe	36,2	—34,0	2	—	—	[61]
Ni	—94 ÷ —99	—42 ÷ —44	—0,7 ÷ +0,1	—1,4 ÷ +3,4	0,2 ÷ +1,5	[36, 78]

Таблица 27.5. **Константы магнитострикции α-Co (ГПУ)* при различных температурах [70]**

T, °C	λ_A, 10^{-6}	λ_B, 10^{-6}	λ_C, 10^{-6}	λ_D, 10^{-6}
—200	—66	—123	+126	—128
0	—52	—109	+126	—108
20	—50	—107	+126	—105
200	—32	—88	+120	—82
400	—16	—70	+105	—52
20 [39]	—45	—95	+110	—100

* См. примеч. к табл. 27.1.

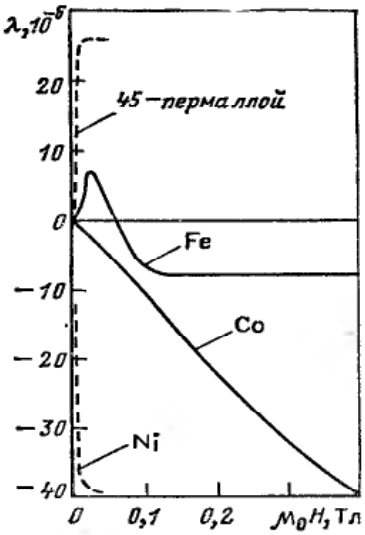


Рис. 27.15. Зависимости продольной магнитострикции поликристаллических образцов от индукции внешнего магнитного поля при $T = 20$°C [3]

27.2.2. Редкоземельные и актиноидные элементы. Ферромагнитное упорядочение в f-металлах чаще реализуется в довольно сложных магнитных структурах («Конус», «Ферри» на рис. 27.16), переход к которым из парамагнитного состояния («Пара» на рис. 27.16)

осуществляется при понижении температуры, как правило, через антиферромагнитные (АФ) фазы («Спираль», «АФ-конус», «Волна» на рис. 27.16).

Есть сведения о ферромагнитных, метастабильных при комнатной и более низких температурах, кубических фазах Pr, Nd и Pm [80]. Обнаружен [71] ферромагнетизм кубической гранецентрированной фазы Cm (см. рис. 27.29, 27.30), которая также, видимо, метастабильна при температурах, меньших температуры Кюри.

Данные о магнитных свойствах редкоземельных металлов приведены в табл. 27.6.

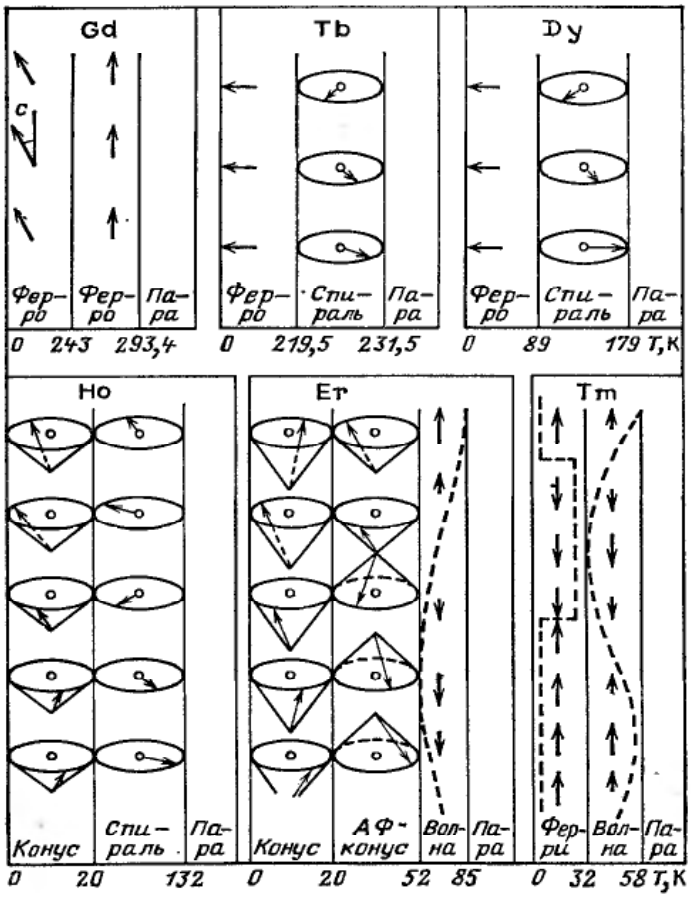


Рис. 27.16. Виды магнитного упорядочения в тяжелых редкоземельных элементах по данным нейтронографии [80]

Таблица 27.6. **Магнитные свойства ферро- и ферримагнитных редкоземельных металлов (фаза с пространственной группой $P6_3/mmc$)** [80]

Элемент	$\mu_{эф}$, μ_B	n, μ_B	Направление оси легкого намагничивания при $T=0$ К	T_N, К	T_C, К	Θ_p, К	
						$H \parallel c$	$H \perp c$
Gd	7,98	7,63	—	—	293,4	317	317
Tb	9,77	9,34	b	230,0	219,5	195	239
Dy	10,83	10,33	a	179,0	89,0	121	169
Ho	11,2	10,34	b	132,0	20,0	73,0	88,0
Er	9,9	9,1	—	85,0	20,0	61,7	32,5
Tm	7,61	7,14	c	58,0	32,0	41,0	—17,0

Температурные и полевые зависимости спонтанного магнитного момента, а также температурные зависимости обратной парамагнитной восприимчивости рассматриваемой группы элементов даны на рис. 27.17—27.30.

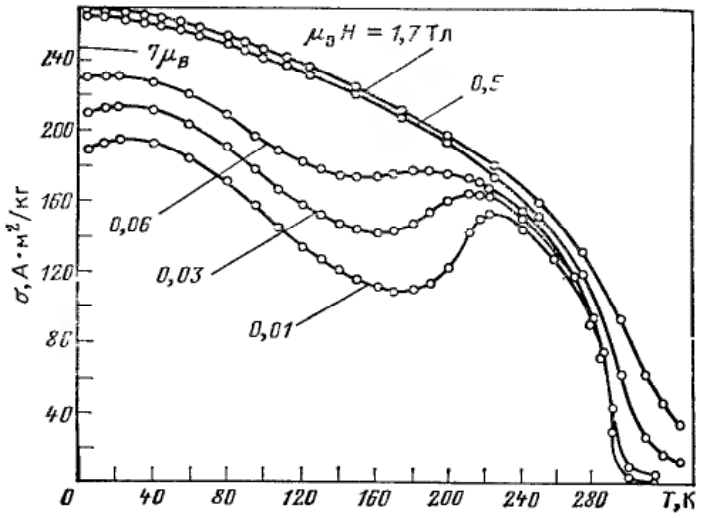


Рис. 27.17. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси c) кристалла Gd при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [92]

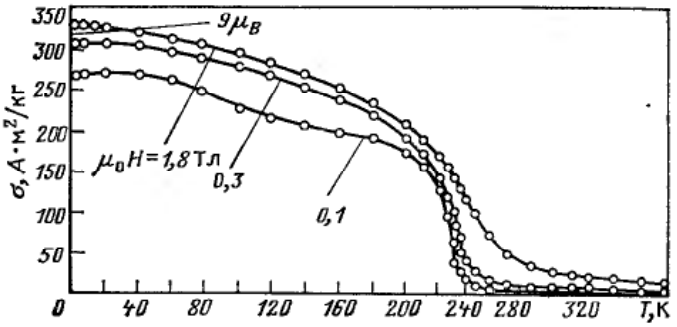


Рис. 27.18. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси b) кристалла Tb при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [66]

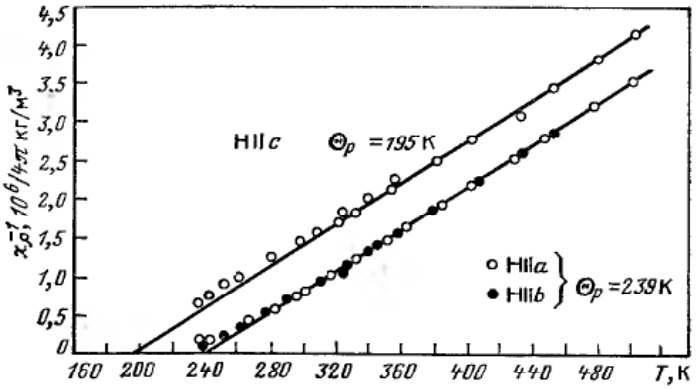


Рис. 27.19. Температурные зависимости обратной удельной парамагнитной восприимчивости (вдоль осей a, b и c) кристалла Tb [62]

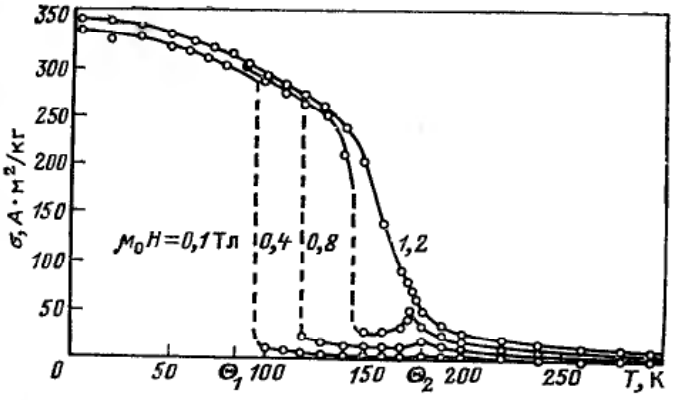


Рис. 27.20. Температурные зависимости удельного магнитного момента монокристалла Dy при различных значениях индукции магнитного поля, приложенного вдоль осн a в базисной плоскости [34]

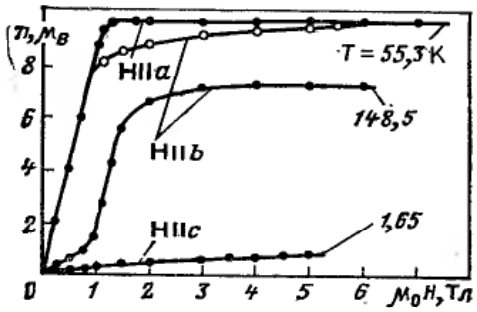


Рис. 27.21. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Dy от индукции внешнего поля [58]

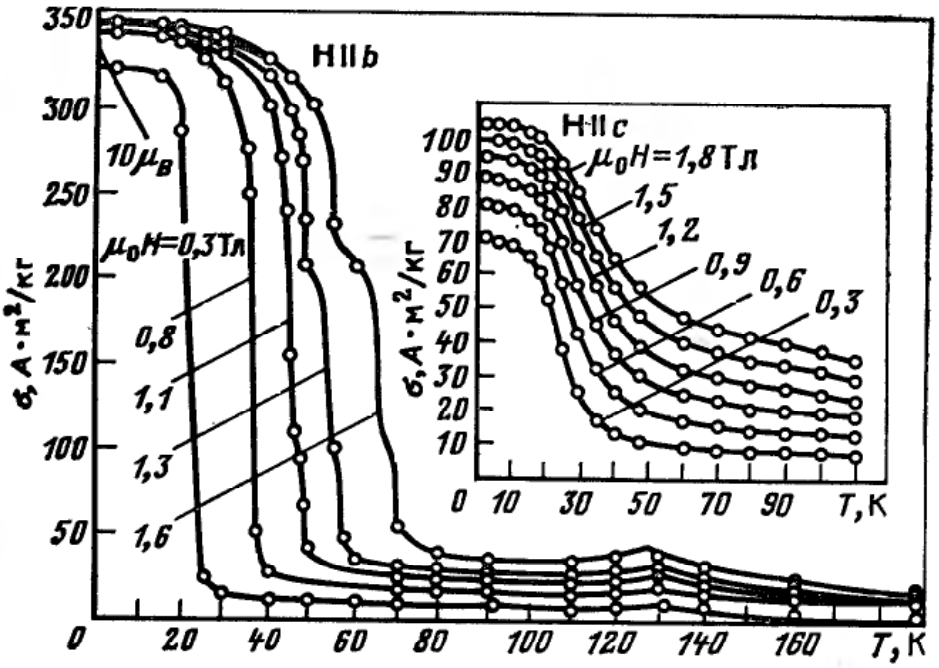


Рис. 27.22. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль осей b и c) кристалла Ho при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [103]

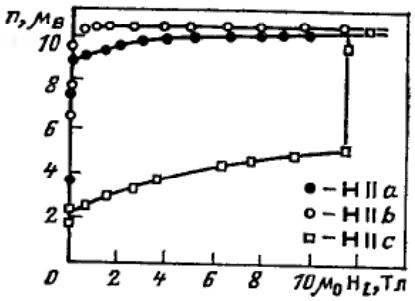


Рис. 27.23. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Ho от индукции внутреннего магнитного поля. Внешнее магнитное поле прикладывалось вдоль осей a, b и c при температуре 4,2 К [40]

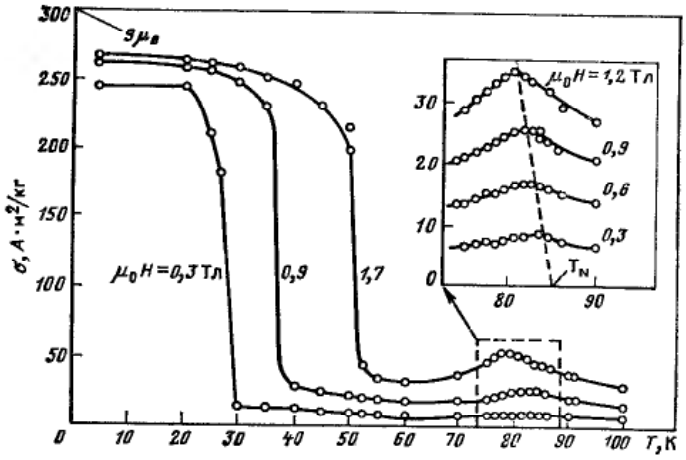


Рис. 27.24. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси c) кристалла Er при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [63]

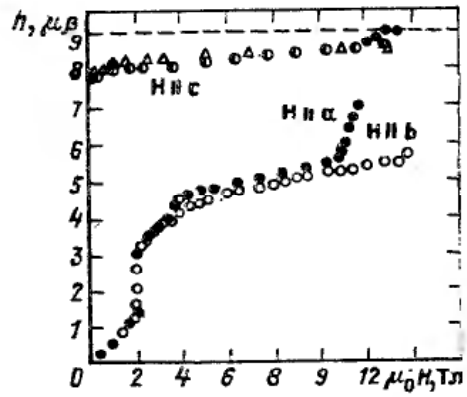


Рис. 27.25. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Er от индукции магнитного поля, приложенного вдоль осей *a*, *b* и *c*, при температуре 4,2 К [40]:
◐ — значения *n* из [97], умноженные на 0,963 [86]

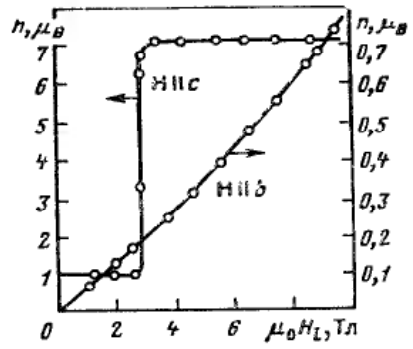


Рис. 27.28. Зависимости атомного магнитного момента монокристалла Tm от индукции внутреннего магнитного поля при $T=4{,}2$ К [98]

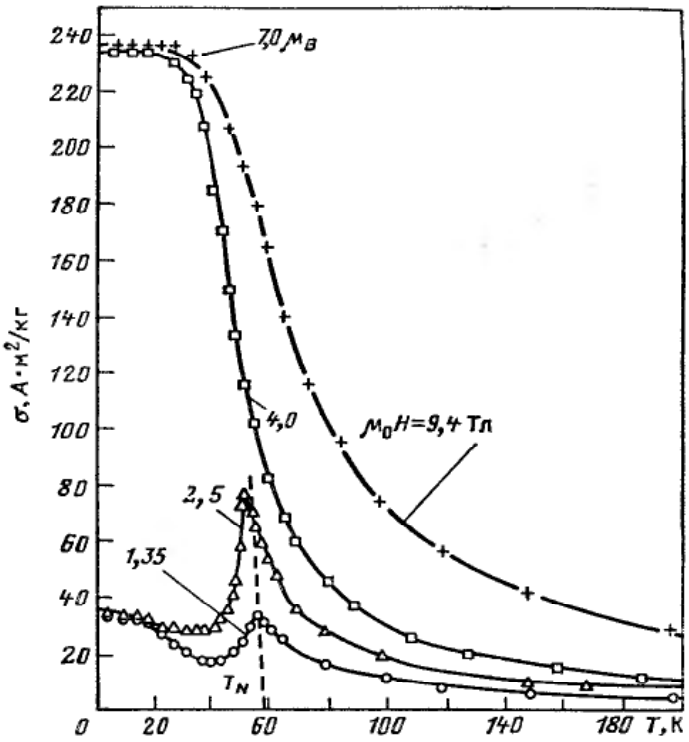


Рис. 27.26. Температурные зависимости удельного магнитного момента (вдоль оси *c*) кристалла Tm [98]

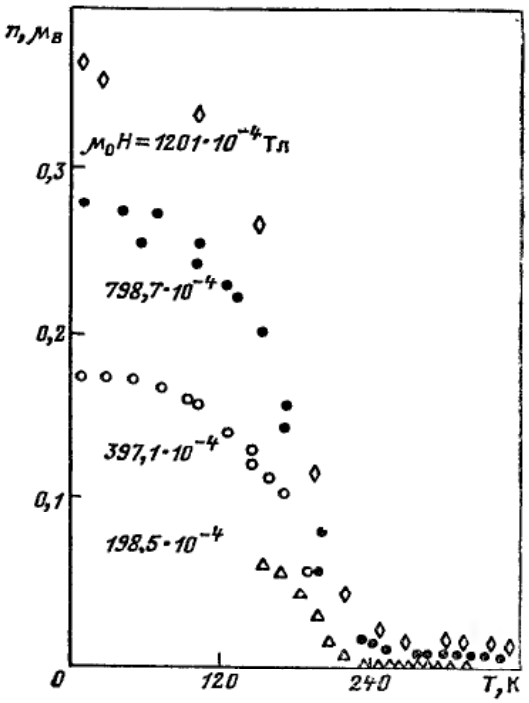


Рис. 27.29. Температурные зависимости атомного магнитного момента для Cm в гранецентрированной кубической β-фазе при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [71]

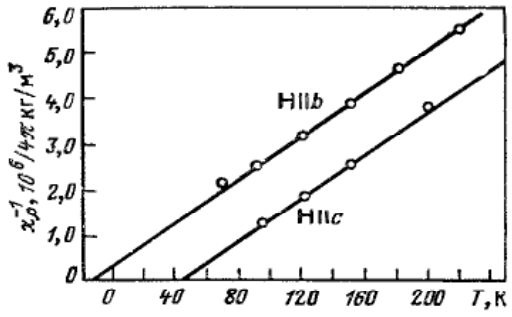


Рис. 27.27. Температурные зависимости обратной удельной восприимчивости в парамагнитной области (вдоль осей *b* и *c*) кристалла Tm [98]

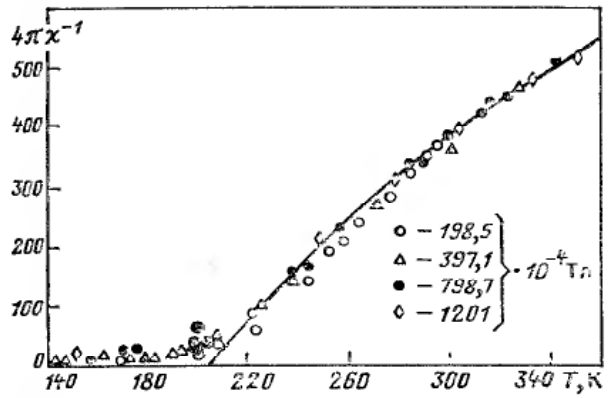


Рис. 27.30. Температурные зависимости обратной объемной парамагнитной восприимчивости Cm в гранецентрированной кубической β-фазе при различных значениях индукции внешнего магнитного поля [71]

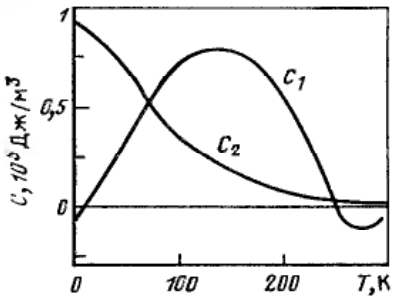


Рис. 27.31. Температурные зависимости констант $C_1 = -K_1 + K_2$ и $C_2 = K_2/2$ магнитной анизотропии гексагонального кристалла Gd [87]

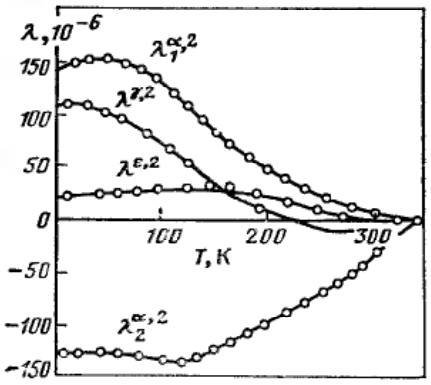


Рис. 27.32. Температурные зависимости констант магнитострикции Gd [88]

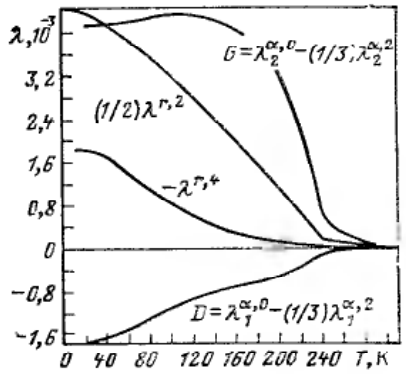


Рис. 27.33. Температурные зависимости констант магнитострикции Tb, экстраполированных к нулевому внешнему полю [96]

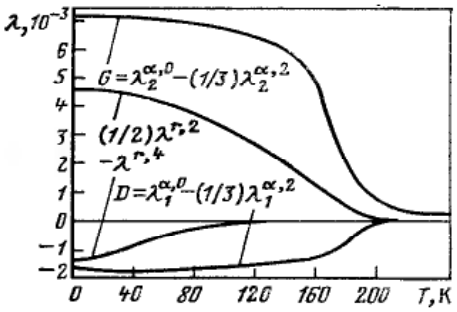


Рис. 27.34. Температурные зависимости констант магнитострикции Dy во внешнем поле с индукцией 3 Тл [95]

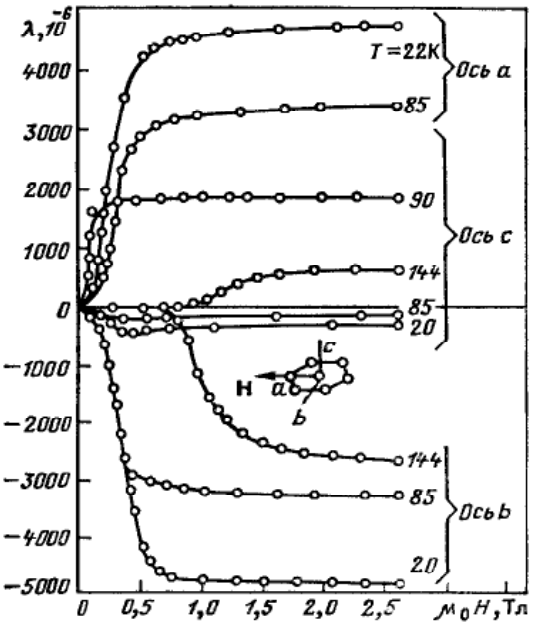


Рис. 27.35. Зависимости магиитострикции вдоль осей монокристалла Dy от индукции магнитного поля, приложенного вдоль оси *a* [79]

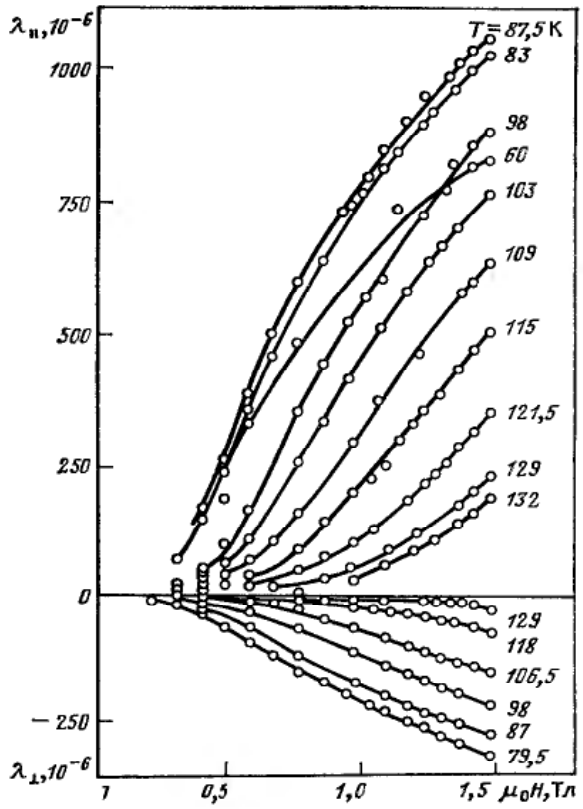


Рис. 27.36. Изотермы продольной $\lambda_{\parallel}$ и поперечной $\lambda_{\perp}$ магнитострикций поликристаллического гексагонального Dy [1]

Далее приведены характерные температурные зависимости констант анизотропии и магнитострикции для тяжелых редкоземельных элементов (рис. 27.31—27.34) и, наконец, в качестве примера — зависимость магнитострикции от индукции магнитного поля для Dy (рис. 27.35, 27.36).

27.3. СПЛАВЫ

Большинство данных этого параграфа относится к двухкомпонентным системам. Исключение составляют система сплавов Fe—Co—Ni и гейслеровы сплавы.

27.3.1. Сплавы на осиове *d*-элементов. Эти сплавы дают огромное разнообразие сочетаний магнитных свойств, зависящих, как правило, от механической и термомагнитной обработки. Это обеспечивает их широкое применение. В этом пункте кроме данных о хорошо изученных и используемых в технике сплавах на основе Fe, Co и Ni (табл. 27.7, 27.8, 27.12 и рис. 27.37—27.54) приведены сведения о гейслеровых сплавах (табл. 27.9), некоторых интерметаллидах (табл. 27.11) и слабых зонных ферромагнетиках (табл. 27.10). В последних малая спонтанная намагниченность ($n<\mu_B$) возникает в результате упорядочения спинов электронов проводимости.

Данные о разбавленных сплавах, обладающих своеобразными ферромагнитными свойствами (см. [89]), не приводятся.

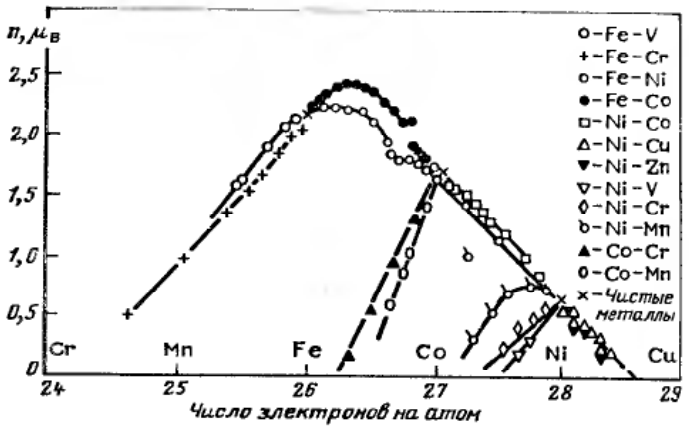


Рис. 27.37. Зависимость атомного магнитного момента сплавов и чистых металлов от среднего числа электронов на атом [3] (кривая Слэтера — Полинга)

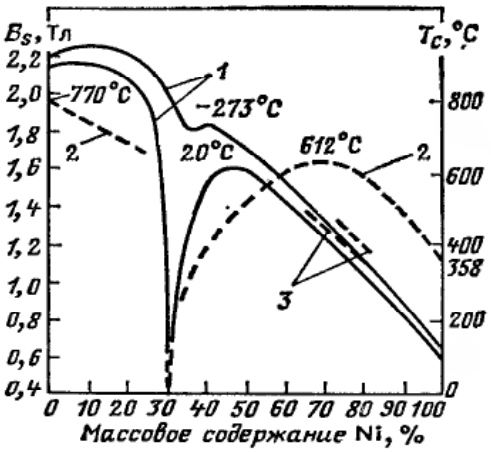


Рис. 27.38. Индукция насыщения (*1*) температура Кюри (*2*) сплавов Fe—Ni и индукция насыщения упорядоченных сплавов с составом, близким к $FeNi_3$ (*3*) [3]

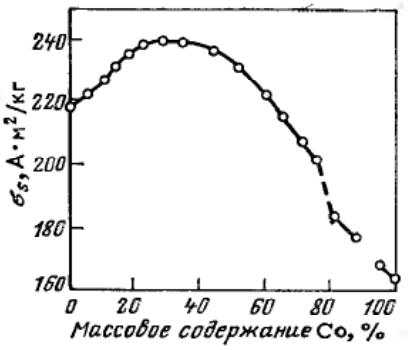


Рис. 27.39. Удельный магнитный момент насыщения сплавов Fe — Co при $T=20$°C [108]

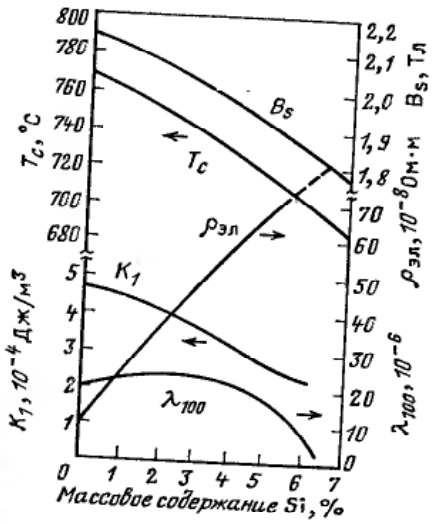


Рис. 27.40. Магнитные свойства и удельное электрическое сопротивление сплавов Fe—Si при T=20°C [81]

Таблица 27.7. **Удельный магнитный момент насыщения и температура Кюри бинарных сплавов железа** [30]

Второй компонент сплава	Атомное содержание, %	σ_S, А · м²/кг (T = 20 °C)	n, μ_B	T_C, К
Al	7,1	207	2,05	1029
	19,7	184	1,74	937
	24,9	134	1,29	714
	26,0	149	1,40	767
Au	6,2	174	2,08	1040
	10,2	154	2,02	1041
Co	20	236	2,42	1223
	33	238	2,52	1243
	50	233	2,42	1253
	75	203	2,14	1143
	80	184	1,94	1183
Cr	17,7	196	1,70	951
	47,5	90	0,98	756
	67,8	35	0,53	541
Ir	4,0	200	2,25	1023
	15,0	120	1,67	—
Os	8,1	158	1,97	—
	12,5	50	0,69	—
Pd	5,5	203	2,19	1027
	40,0	129	1,89	—
	74,8	45	0,97	523
Pt	8,1	191	2,36	—
	12,4	177	2,43	—
	24,8	104	2,23	437
	50,0	32	0,75	—

Продолжение табл. 27.7

Второй компонент сплава	Атомное содержание, %	σ_S, А · м²/кг (T = 20 °C)	n, μ_B	T_C, К
Rh	10,0	209	2,32	—
	25,0	192	2,39	987
	40	161	2,26	897
Ru	7,0	200	2,18	933
	12,5	105	1,17	—
Sn	2,3	208	2,18	1041
	6,0	197	2,16	1041
Si	8,3	204	2,00	993
	15,9	174	1,67	926
	23,5	141	1,32	860
V	5,9	204	2,09	1088
	10,6	184	1,91	1078
	18,6	149	1,58	1056

Таблица 27.8. **Удельный магнитный момент насыщения и температура Кюри бинарных сплавов кобальта** [30]

Второй компонент сплава	Атомное содержание, %	σ_S, А · м²/кг (T = 20 °C)	n, μ_B	T_C, К
Cr	5,6	134	1,42	—
	10,6	100	1,07	—
	16,7	59,5	0,64	—
	22,1	19	0,24	—
Mn	4,2	144	1,53	—
	11,9	109	1,16	—
	17,3	84	0,89	—
	22,5	48	0,57	—
Ni	40	124	1,38	1173
	70	90	0,97	953

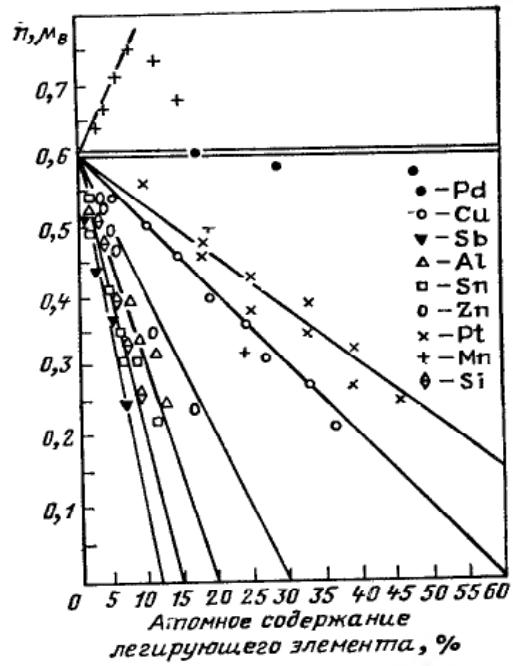


Рис. 27.41. Зависимости атомных магнитных моментов насыщения от состава сплавов Ni с неферромагнитными металлами [3]

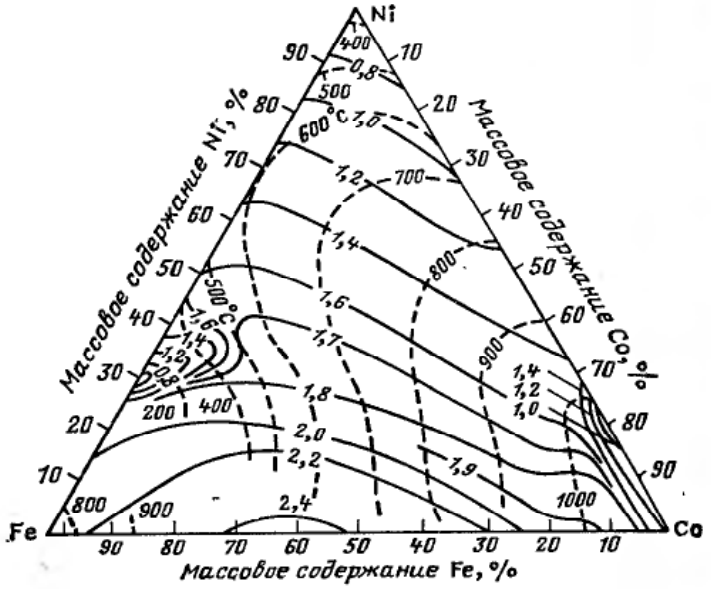


Рис. 27.43. Индукция, соответствующая намагниченности $\mu_0 J$, Тл (сплошные кривые), в поле с $H = 1{,}19 \cdot 10^5$ А/м и температура Кюри, °С (пунктир) сплавов Fe—Co—Ni [72]

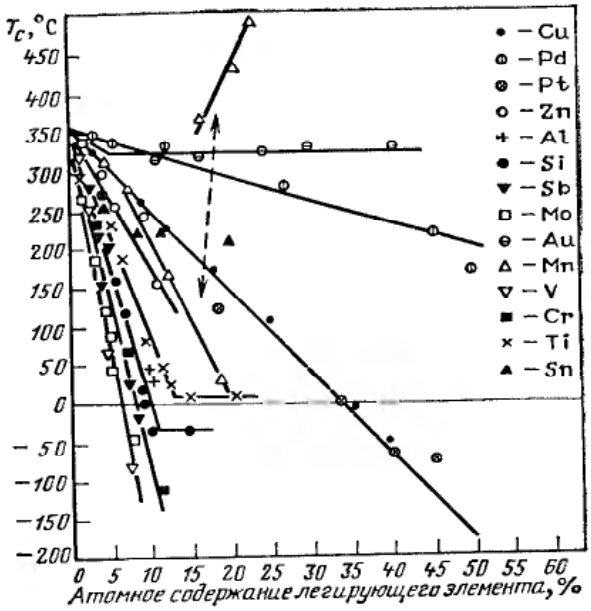


Рис. 27.42. Температуры Кюри сплавов Ni [3]

Таблица 27.9. Температура Кюри и атомные магнитные моменты гейслеровых сплавов (простая кубическая структура CsCl) [106]

Соединение	T_C, К	n, μ_B	Соединение	T_C, К	n, μ_B
Cu_2MnAl	600	3,6	Ni_2MnGa	379	4,2
Cu_2MnIn	520	4,0	Ni_2MnIn	323	4,4
Cu_2MnSn	530	4,1	Ni_2MnSn	344	4,1
Co_2MbSi	982	5,1	Ni_2MnSb	360	3,3
Co_2MnGa	694	4,1	Pd_2MnGe	170	3,2
Co_2MnGe	905	5,1	Pd_2MnSn	189	4,2
Co_2MnSn	829	5,1	Pd_2MnSb	247	4,4
			Au_2MnAl	258	3,1

Таблица 27.10. **Магнитные свойства и кристаллическая структура слабых зонных ферромагнетиков на основе переходных d-элементов [2, 101]**

Соединение	Кристаллическая структура		$10^3 \rho$, кг/м³	T_C, К	θ_p, К	$\mu_{эф}$, μ_B	n, μ_B	Литература
	Сингония, пространственная группа	Параметры решетки, нм						
$ZrZn_2$	Кубическая $Fd3m$	$a = 0{,}739$	7,16	16—27	33	1,3—1,4 0,75	0,12—0,18	[83, 85] [93]
Sc_3In	Гексагональная $P6_3/mmc$	$a = 0{,}642 \div 0{,}656$ $c = 0{,}512 \div 0{,}518$	4,38	6—7,5	16	0,67—1,3	0,06—0,15 (Sc)	[60, 84]
Au_4V	Объемноцентрированная тетрагональная структура типа Ni_4Mo $D1_a$	$a = 0{,}640$ $c = 0{,}398$		43—55	—	1,4—1,7	0,41—0,92 (V)	[51, 53]
Ni_3Al	Орторомбическая		7,45	41,5—75	130	1,0	0,075—0,1	[35]

Таблица 27.11. **Атомные магнитные моменты в расчете на атом $3d$-элемента и температуры Кюри некоторых бинарных интерметаллидов [41]**

Соединение	Сингония (тип кристаллической структуры)	T_C, К	n, μ_B
Au_4Mn	Объемноцентрированная тетрагональная (Ni_4Mo)	363	4,15
CoB	Орторомбическая (FeB)	477	0,28
Co_2B	Тетрагональная ($CuAl_2$)	429	0,76
Co_3B	Орторомбическая (Fe_3C)	747	1,11
CoPt	Тетрагональная (AuCu)	813	0,17
CoS_2	ГЦК (FeS_2)	122—130	0,84—0,96
$CrBe_{12}$	Тетрагональная ($MoBe_{12}$)	50	~0,2
$CrGe_2$	—	98	~0,1
$Cr_{1.2}Pt_{2,8}$	ГЦК (Cu_3Au)	>77	2,56 (Cr) ~0,47 (Pt)
$CrS_{1,19}$	Гексагональная (NiAs)	160 (T_N) 305(T_C)	0,11
CrTe	Гексагональная (NiAs)	239—334	2,45
Cr_3Te_4	Моноклинная	80 (T_N) 329 (T_C)	2,3
FeAl	Кубическая (CsCl)	623	~1,0
Fe_3Al	ОЦК (сверхрешетка CsCl)	773	1,46 (Fe I) 2,14 (Fe II)
FeB	Орторомбическая (FeB)	598	1,12
Fe_2B	Тетрагональная ($CuAl_2$)	1043	1,91
$FeBe_5$	ГЦК ($MgCu_2$)	75	~0,1
Fe_3C	Орторомбическая (Fe_3C)	483	2,01
Fe_3Cr	ГЦК (Cu_3Au)	993	~1,3
Fe_3Ge	Гексагональная (Ni_3Sn)	365	1,90
FeP	Орторомбическая (MnP)	215	0,36

Продолжение табл. 27.11

Соединение	Сингония (тип кристаллической структуры)	T_C, К	n, μ_B
Fe_2P	Гексагональная (Fe_2P)	266—278	0,77—1,32
Fe_3P	Тетрагональная (Ni_3P)	716	1,84
$FePd_3$	ГЦК (Cu_3Au)	540	2,7 (Fe) 0,5 (Pd)
FePt	Тетрагональная (AuCu)	743	~0,2
FeRh	Кубическая (CsCl)	330 (T_N) 675 (T_C)	3,0 (Fe) 0,9 (Rh)
Fe_3Si	Кубическая (Cu_2MnAl)	808	1,51 (Fe I) 2,15 (Fe II)
Fe_3Sn	Гексагональная (Ni_3Sn)	743	1,9
MnAs	Гексагональная (NiAs)	318 (нагревание) 306 (охлаждение)	3,4
MnB	Орторомбическая (FeB)	578	1,92
MnB_2	Гексагональная (AlB_2)	143—157	0,19—0,25
MnBi	Гексагональная (NiAs)	633	3,52
Mn_3Ga	Гексагональная	470	~0,02
Mn_3Ge	Гексагональная (Ni_3Sn)	28	0,38
Mn_5Ge_3	Гексагональная (Mn_5Si_3)	320	2,5
Mn_3In	Кубическая (Cu_5Zn_8, γ-латунь)	583	~0,1
$MnPt_3$	ГЦК (Cu_3Au)	<300	3,60 (Mn) 0,17 (Pt)
MnSb	Гексагональная (NiAs)	583	3,53
MnSi	Кубическая (FeSi)	34	0,4
Mn_5Sn_3	Гексагональная (NiIn)	263	1,23
Mn_5Y	Орторомбическая ($GdMn_5$)	490	2,2

Продолжение табл. 27.11

Соединение	Сингония (тип кристаллической структуры)	T_C, К	n, μ_B
$MnZn_3$	Гексагональная (Ni_3Sn)	>400	~1,0
NiPt	Тетрагональная (AuCu)	136	0,06
Ni_3Y	Орторомбическая ($CeNi_3$)	33	0,16

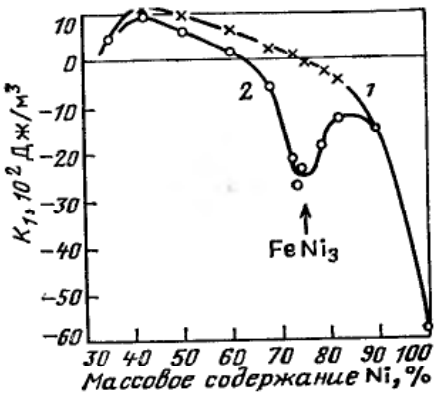


Рис. 27.44. Константа магнитной анизотропии K_1 для сплавов Fe—Ni при T=20°С:

1 — закаленные, неупорядоченные сплавы; *2* — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы [38]

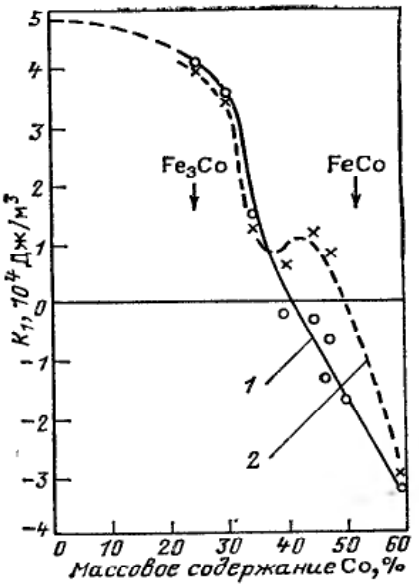


Рис. 27.45. Константы магнитной аиизотропии K_1 для сплавов Fe—Co при T=20°С:

1 — закаленные, упорядоченные сплавы; *2* — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы [65]

Таблица 27.12. **Зависимость констант магнитной анизотропии K_1 и K_2, 10^2 Дж/м^3, для сплавов Fe—Co—Ni и Co—Ni от температуры [3, 77]**

Массовый состав, %			T = 20 °С		T = 200 °С		T = 398 °С	
Fe	Co	Ni	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
50	10	40	61	—160	19	4	7	—60
25	25	50	4	16	4	2	—3	22
20	15	65	9	—110	—1	—18	—3	2
15	25	60	—26	34	—10	—45	—3	—15
10	40	50	—72	—4	—54	41	—9	—102
10	30	60	—38	—80	—17	—50	—12	—37
10	20	70	—29	17	—25	70	—14	29
10	10	80	—2	—39	—2	—20	—2	6
—	65	35	—258	150	—	—	—	—
—	50	50	—108	—40	—	—	—	—
—	40	60	—74	40	—	—	—	—
—	20	80	—4	8	—	—	—	—
—	10	90	16	—40	—	—	—	—
—	3	97	—10	9	—	—	—	—

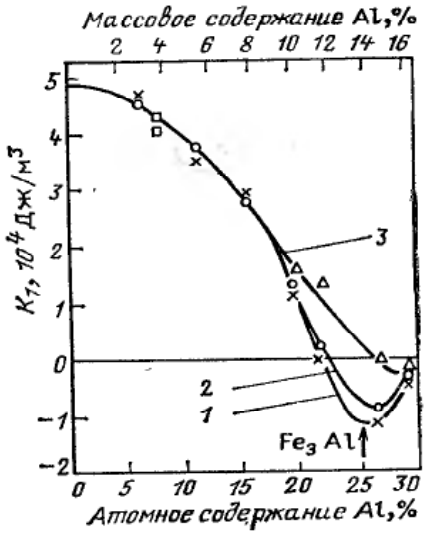


Рис. 27.46. Константы магнитной анизотропии K_1 для сплавов Fe—Al при T=20°С:

1 — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы; *2* — частично упорядоченные сплавы; *3* — закаленные, неупорядоченные сплавы [64]

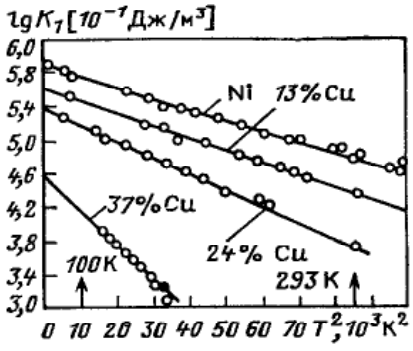


Рис. 27.47. Температурные зависимости константы магнитной анизотропии сплавов Ni—Cu различного состава [3]

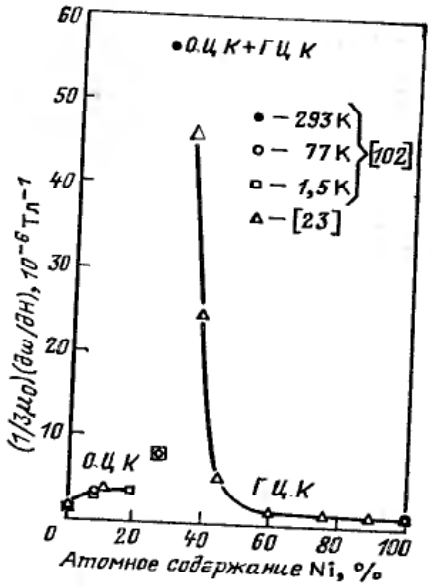


Рис. 27.48. Производная $(1/3\ \mu_0)\ (\partial\omega/\partial H)_T$ для сплавов Fe—Ni

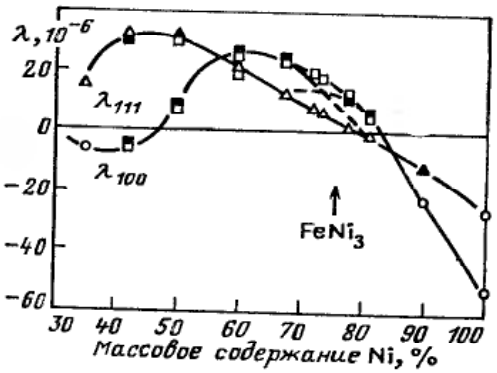


Рис. 27.49. Константы магнитострикции кубических гранецентрированных сплавов Fe—Ni при $T=20$°C:

сплошные кривые — закаленные, неупорядоченные сплавы; пунктир — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы [38]

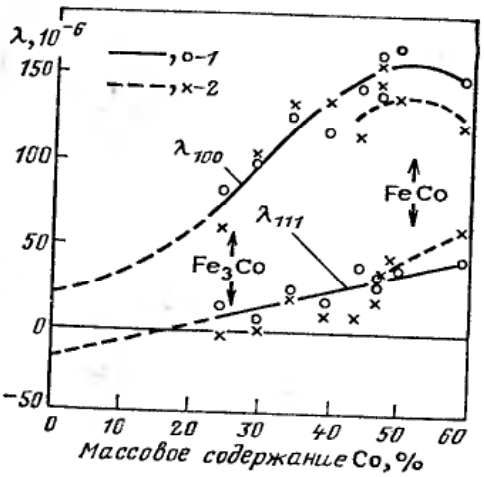


Рис. 27.50. Магнитострикция насыщения вдоль кристаллографических осей [100] и [111] для сплавов Fe—Co при $T=20$°C:

1 — закаленные, неупорядоченные сплавы; *2* — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы [65]

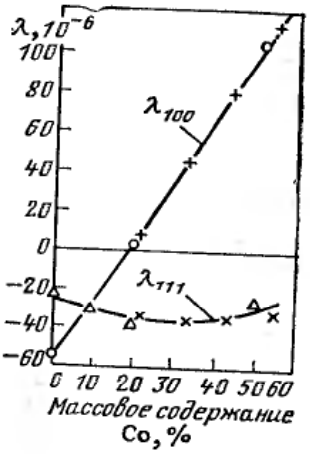


Рис. 27.51. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} кубических гранецентрированных сплавов Co—Ni при $T=20$°C [45] по данным [64, 111]

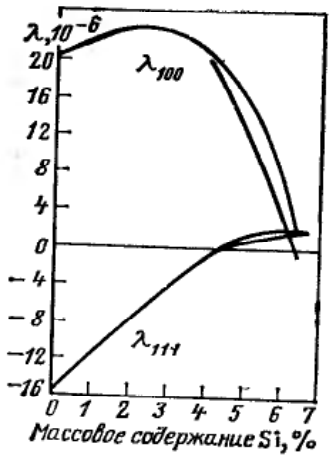


Рис. 27.52. Константы магнитострикции сплавов Fe—Si при $T=20$°C:

нижние кривые в области массового содержания Si 4—7%-зависимости для более упорядоченных образцов, охлаждавшихся медленнее [64]

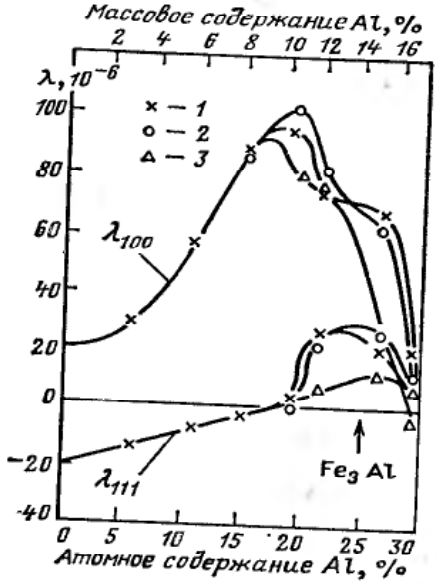


Рис. 27.53. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} вдоль кристаллографических осей [100] и [111] для сплавов Fe—Al при $T=20$°C:

1 — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы; *2* — охлажденные с промежуточной скоростью, частично упорядоченные сплавы; 3 — закаленные, неупорядоченные сплавы [64]

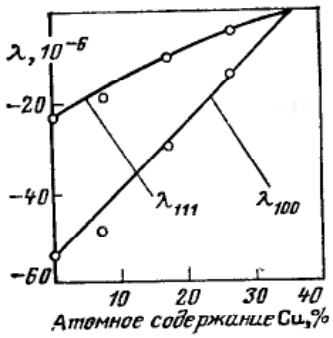


Рис. 27.54. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} сплавов Ni—Cu при $T=20$°C [77]

27.3.2. Сплавы на основе *f*-элемеитов. При всем многообразии сплавов редкоземельных элементов приведены данные только для трех характерных систем интерметаллидов (R — редкоземельный элемент): RFe_2, RCo_5 и R_2Co_{17} (табл. 27.13, 27.14 и рис. 27.55—27.68). Материалы иа их основе находят применение в технике. Более полная информация о свойствах этих веществ содержится в [43]. Данные о некоторых ферромагнитных соединениях и сплавах актиноидов приведены в табл. 27.15, 27.16.

Таблица 27.13. **Магиитные моменты насыщеиия, температуры Кюри и температуры компенсации интерметаллидов (пространственная группа *Fd3m*)** [43]

Соединение	n, μ_B	T_C, К	$T_{комп}$, К
YFe_2	2,78—3,1	535—554	—
$CeFe_2$	2,38—2,59	221—240	—
SmF_2	2,50—2,8	676—700	—
$GdFe_2$	2,8—3,75	785—810	—
$TbFe_2$*	3,68—5,8	696—711	—
DyF_2	4,9—7,31	633—638	—
$HoFe_2$*	5,1—6,67	597—614	—
$ErFe_2$*	4,75—5,85	590—595	480—490
$TmFe_2$	2,52—2,7	566—610	255—248
$YbFe_2$	1,8—2,3	—	31
$LuFe_2$	2,70—2,97	558—610	—

* Ферримагнитная структура.

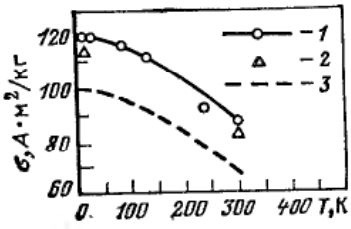


Рис. 27.55. Температурные зависимости удельной намагниченности сплава $TbFe_2$ [49]:

1 — монокристалл, ось [111]; *2* — поликристалл в поле с индукцией 12 Тл [49]; *3* — поликристалл [42]

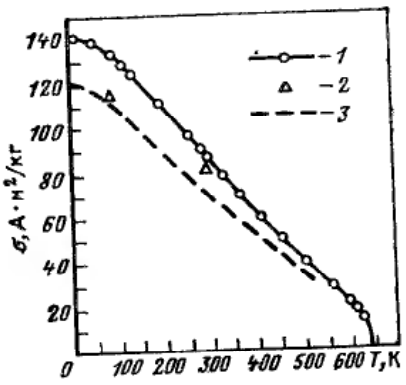


Рис. 27.56. Температурные зависимости удельного магнитного момента сплава $DyFe_2$ [49]:

1 — монокристалл, ось [100]; *2* — поликристалл в поле с индукцией 12 Тл [49]; *3* — поликристалл [42]

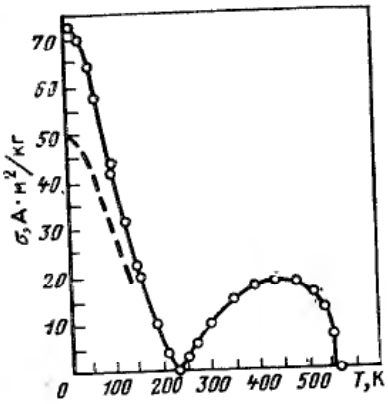


Рис. 27.57. Температурные зависимости удельного магнитного момента сплава $TmFe_2$ [49]:

сплошная кривая — монокристалл, ось [111] [49]; пунктир — поликристалл [42]

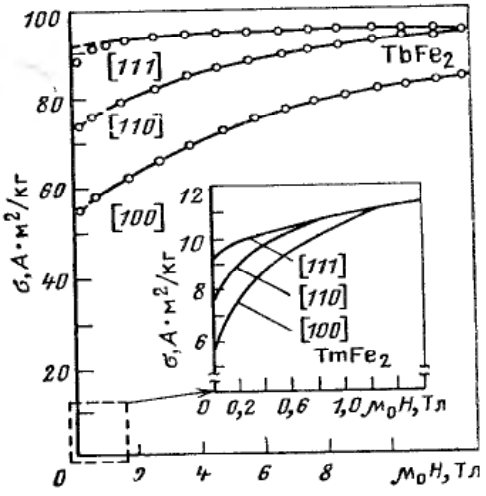


Рис. 27.58. Кривые намагничивания $TbFe_2$ и $TmFe_2$ при $T=20$°C [29, 47]

Таблица 27.14. **Магнитные свойства и постоянные решетки интерметаллидов RCo_5 (пространственная группа Pb/mmm)** [22, 43]

Соединение	a, нм	c, нм	ρ, 10^3 кг/м^3	n, μ_B	T_C, К	$T_{комп}$, К
YCo_5*1	0,4941	0,3971	7,60	6,8—8,2	977—997	—
$LaCo_5$	0,5052	0,3970	8,03	7,3	840	—
$CeCo_5$*1	0,4923	0,4019	8,57	5,7—7,4	737	—
$PrCo_5$	0,5013	0,3988	8,32	9,9—10,0	912	—
$NdCo_5$*1	0,5015	0,3982	8,39	9,5—11,7	910	—
$SmCo_5$	0,5001	0,3970	8,53	6,0—6,8	1020	—
$GdCo_5$	0,4974	0,3971	8,86	1,2—1,5	1008—1020	—
$TbCo_{5,1}$*2	0,4951	0,3978	8,91	0,57—0,8	980	99—120
$DyCo_{5,2}$*2	0,4910	0,3996	9,15	0,7—1,5	966	93—
$HoCo_{5,5}$*2	0,4888	0,4003	9,13	1,1—2,0	1000—1066	—170 71
$ErCo_{5,9}$	0,4873	0,4003	9,03	0,46—2,1	986—1123	—
$TmCo_6$	—	—	—	1,5—1,9	1020	—

*1 Ферромагнитная структура.
*2 Ферримагнитная структура.

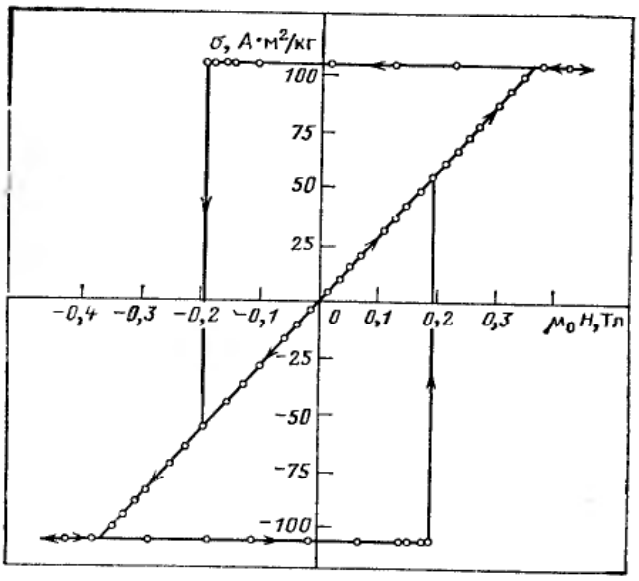


Рис. 27.60. Кривая намагничивания и петля гистерезиса монокристаллического образца $SmCo_{5,3}$, снятые вдоль оси c при $T=20$°C после травления и электрополировки. Амплитудное значение индукции равно 3,0 Тл [19]

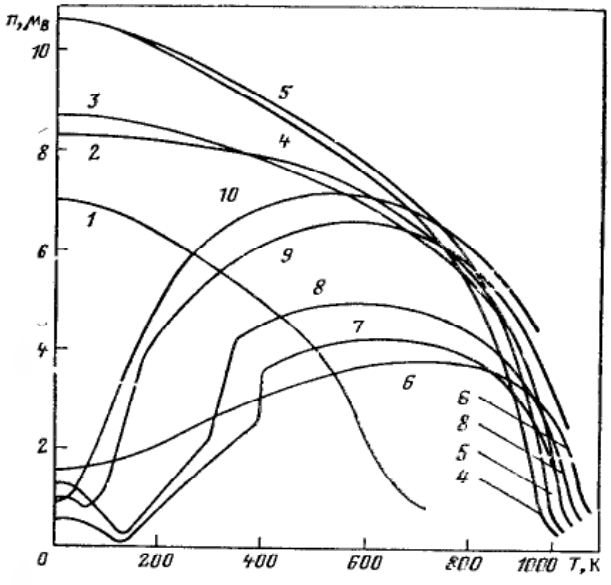


Рис. 27.59. Температурные зависимости атомных магнитных моментов в расчете на формульную единицу соединений RCo_5:

1 — $CeCo_5$; *2* — YCo_5; *3* — $SmCo_5$; *4* — $NdCo_5$; *5* — $PrCo_5$, *6* — $CdCo_5$; *7* — $TbCo_{5,1}$; *8* — $DyCo_{5,2}$; *9* — $HoCo_{5,5}$; *10* — $ErCo_6$ [21]

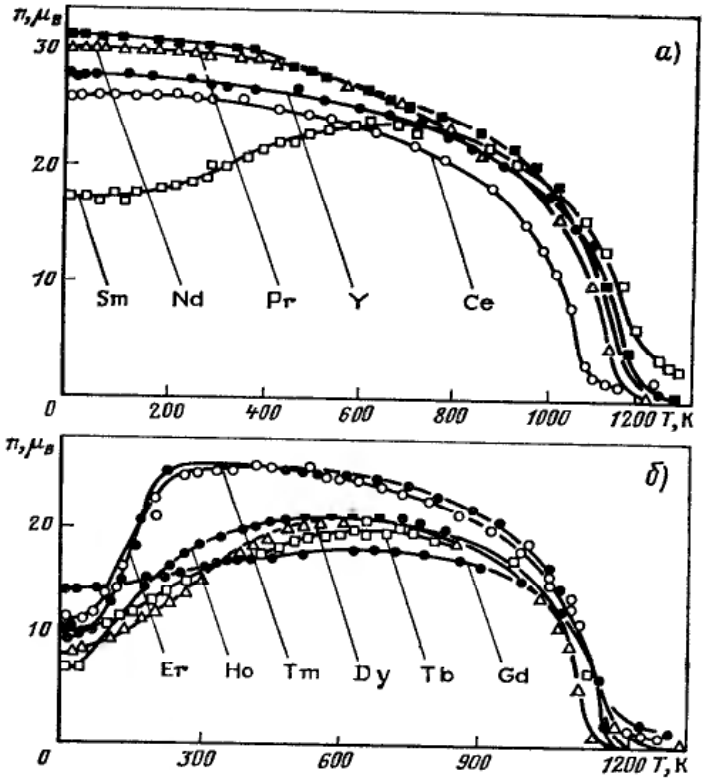


Рис. 27.61. Температурные зависимости атомных магнитных моментов, приходящихся на формульную единицу соединений R_2Co_{17} с легкими лантаноидами и иттрием (*а*) и с тяжелыми лантаноидами (*б*). Измерено в поле с индукцией 2 Тл [76]

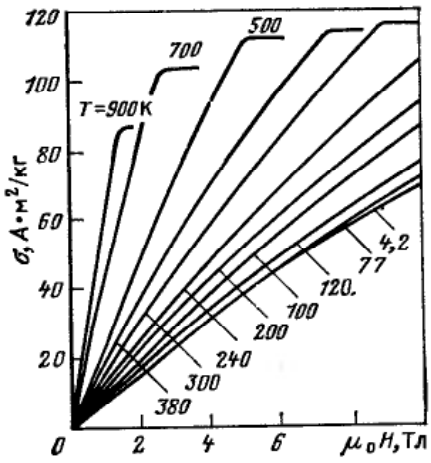


Рис. 27.62. Кривые намагничивания монокристалла Sm_2Co_{17} в направлении кристаллографической оси [100] при различных температурах [24]

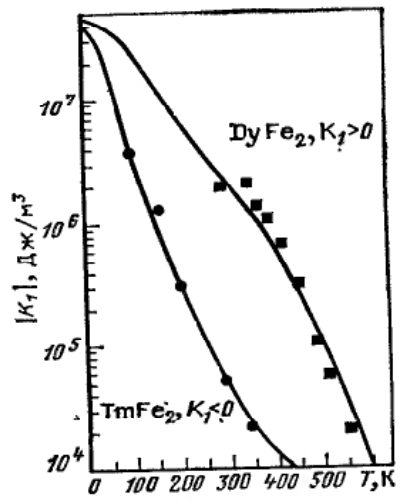


Рис. 27.63. Температурные зависимости абсолютного значения константы магнитной анизотропии K_1 для $DyFe_2$ и $TmFe_2$ [49]

Таблица 27.15. **Магнитные свойства и постоянные решетки ферромагнитных монохалькогенидов и монопниктидов актиноидов (пространственная группа $Fm3m$)** [107]

Соединение	Постоянная решетки, нм	T_C, К	Θ_p, К	$\mu_{эф}$, μ_B	n, μ_B
US	0,5487—0,5490	172—180	173—180	2,22—2,31	1,20—1,76
USe	0,571—0,575	160,5—187	188	2,51	1,31—2,0
UTe	0,6146—0,6161	102—110	104	2,84	1,10—2,20
NpN	0,4898	82—100	82—100	2,13—2,44	1,4—2,2
NpP	0,5651	125	130	1,06	0,42—0,77
PuAs	0,586	129	129	0,97	0,35
PuSb	0,6240	85	90	1,0	0,57
CmN	0,5027—0,5041	109	—	7,02	—
CmAs	0,5905	88—140	—	6,58	—

Таблица 27.16. **Магнитные свойства и кристаллическая структура некоторых ферромагнитных интерметаллидов актиноидов** [107]

Соединение	Кристаллическая структура		T_C, К	Θ_p, К	$\mu_{эф}$, μ_B	n, μ_B
	Сингония, пространственная группа	Параметры решетки, нм				
$ThCo_5$	Гексагональная, $P6/mmm$		410—740	—	—	5—8
$UCo_{5,3}$	Ромбоэдрическая, $R3m$	$a = 0,476$ $c = 3,649$	360	—	—	2,4
UFe_2	Кубическая, $Fd3m$	0,758	160—162	170	2,0—3,0	0,06 (U); 0,59 (Fe); 1,09 (Σ)
UNi_2	Гексагональная, $P6_3/mmc$	$a = 0,406$ $c = 0,825$	30	45	2,5	0,12
UPt	Орторомбическая, $Cmcm$	$a = 0,372$ $b = 1,077$ $c = 0,441$	27—30	—	2,62	0,07—0,52
$NpFe_2$	Кубическая, $Fd3m$	0,7144	492—500	523	4,2	1,09 (Np); 1,35 (Fe); 2,6 (Σ)
$NpAl_2$	Кубическая, $Fd3m$	0,7785	56	56	2,3	1,5
$NpMn_2$	Кубическая $Fd3m$	0,7230	18	—	—	0,3—0,4
$NpNi_2$	Кубическая, $Fd3m$	0,7098	28—32	20	—	1,2
$NpOs_2$	Кубическая, $Fd3m$	0,7528	7,5—8	—110	2,3	0,4
$PuFe_2$	Кубическая, $Fd3m$	0,7190	564—600	599	3,7	0,45 (Pu); 1,47 (Fe); 2,3(Σ)
$AmFe_2$	Кубическая, $Fd3m$	0,730	350—400	—	4	2,8

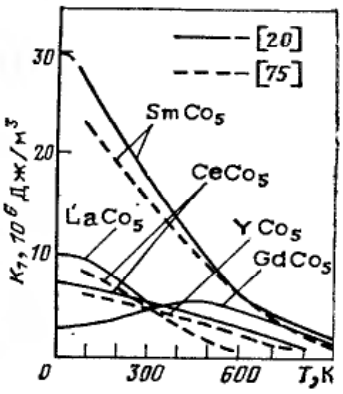


Рис. 27.64. Температурные зависимости константы магнитной анизотропии K_1 в сплавах RCo_5 [43]

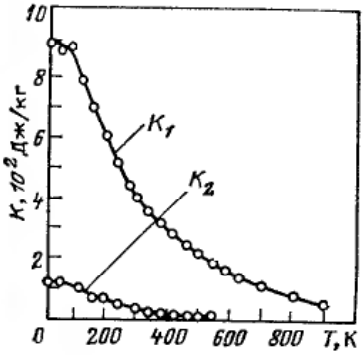


Рис. 27.65. Температурные зависимости констант магнитной анизотропии в соединении Sm_2Co_{17} [17]

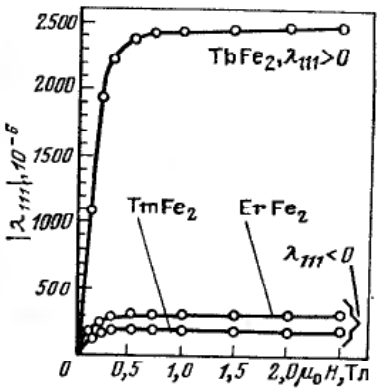


Рис. 27.66. Абсолютное значение константы магнитострикции $|\lambda_{111}|$ монокристаллов $TbFe_2$, $ErFe_2$ и $TmFe_2$ при комнатной температуре [29, 47]

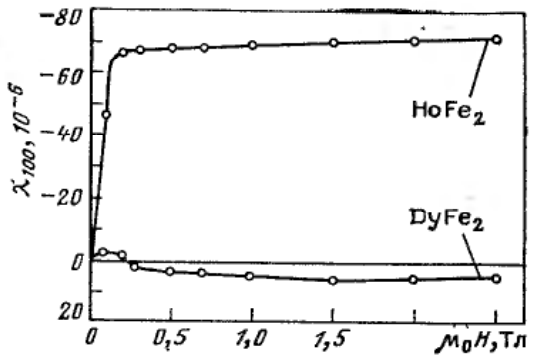


Рис. 27.67. Константа магнитострикции λ_{100} монокристаллов $DyFe_2$ и $HoFe_2$ при $T=20°C$ [50]

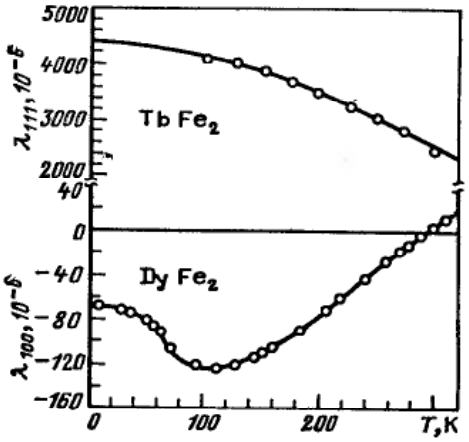


Рис. 27.68. Температурные зависимости констант магнитострикции монокристаллов $TbFe_2$ и $DyFe_2$ [48]

27.4. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

27.4.1. Магнитомягкие материалы. Материалы с наибольшей намагниченностью насыщения. К этой группе материалов принадлежат сорта железа с минимальным количеством примесей (табл. 27.17, 17.18), нелегированные электротехнические стали (табл. 27.19, 27.20), сплавы на основе системы Fe—Co (рис. 27.69—27.72, табл. 27.21, см. также рис. 27.39, 27.45, 27.50, табл. 27.7), в том числе пермендюр (массовый состав 49% Co, 2% V, остальное Fe).

Первая цифра в марках железокобальтовых и железоникелевых сплавов в табл. 27.21 (см. также табл. 27.31) указывает на процентное содержание (по массе) соответственно кобальта (буква К) и никеля (буква Н), следующая цифра — на содержание легирующего элемента — хрома (Х), ванадия (Ф), молибдена (М).

Цифры в пятизначных марках нелегированных электротехнических сталей означают: первая — вид обработки давлением и структурное состояние (1 — горячекатаная и кованая, 2 — калиброванная); вторая — содержание кремния (0 — сталь нелегированная, без нормирования коэффициента старения; 1 — сталь нелегированная с заданным коэффициентом старения); третья — основную нормируемую характеристику (8 — коэрцитивная сила); четвертая и пятая — значение основной нормируемой характеристики (коэрцитивная сила в целых единицах А/м).

Данные этого параграфа, если не указано другое, соответствуют комнатной температуре, т. е. 20°С.

Таблица 27.17. **Химический состав некоторых сортов железа [3]**

Сорт	Массовое содержание, %							
	C	Si	Mn	P	S	O	N	Al
Кипящая низкоуглеродистая электротехническая сталь (армко) [46]	0,015	0,003	0,030	0,005	0,025	0,15	0,007	0,003
Электролитическое железо	0,01	0,004	0,001	0,003	0,003	—	—	0,009
Карбонильное железо	0,02—0,1	0,04—0,05	0,08—0,1	0,005—0,007	0,005—0,007	0,1—0,6	0,005	—

Таблица 27.18. **Магнитные свойства некоторых сортов железа высокой чистоты [46]**

Сорт	B_s, Тл	H_c, А/м	Проницаемость	
			μ_r нач	μ_r max
Литое (плавка в вакууме)	—	22—27	—	17 000—21 000
Электролитическое (отжиг)	—	12—25	44—60	8100—41 500
Электролитическое (плавка в вакууме и отжиг)	—	7,2	1150	61 000
Puron (отжиг в водороде)	2,16	4,0	—	100 000

Таблица 27.19. **Магнитные свойства электротехнической нелегированной стали [14]***

Марка	H_c, А/м	μ_r max, 10^3
10895 20895	95	3,0
10880 20880	80	4,0
10864 20864	64	4,5
10848 20848	48	4,8
20832	32	5,0

* Массовое содержание, %: C ⩽ 0,04; Sl ⩽ 0,3; Mn ⩽ 0,3. Магнитная индукция B_H, Тл, при напряженности магнитного поля H, А/м, не менее: $B_{500} = 1{,}38$; $B_{1000} = 1{,}50$; $B_{2500} = 1{,}62$; $B_{5000} = 1{,}71$; $B_{10\,000} = 1{,}81$; $B_{30\,000} = 2{,}05$.

Таблица 27.20. **Магнитные свойства сортовой электротехнической нелегированной стали [9]***

Марка	H_c, А/м	B, Тл, при H, А/м		
		500	1000	2500
10895 20895 11895 21895	95	1.32	1,45	1,54
10880 20880 11880 21880	80	1,36	1,47	1,57
10864 20864 11864 21864	64	1,40	1,50	1,60

* Массовое содержание, %: C ⩽ 0,035; других примесей — до 0,95.

Таблица 27.21. **Магнитные свойства холоднокатаных сплавов с высокой индукцией технического насыщения [8]**

Марка	B, Тл, при H, А/м			P, Вт/кг			H_c, А/м	μ_r
	400	2500	15 000	$P_{1,5/400}$	$T_{1,8/40}$	$P_{2,0/400}$		
27КХ	—	1,75—1,80	2,05—2,15	80—100	—	—	—	—
49К2ФА	1,8—2,0	2,1—2,2	—	—	25—39	30—55	40—140	5500
49КФ	—	1,9—2,0	2,1—2,2	—	—	—	160	—
49К2Ф	—	—	2,25	—	—	—	160	700 при $H = 0{,}8$ А/м

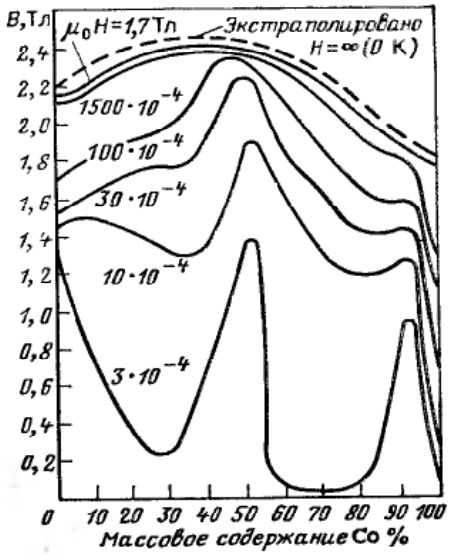


Рис. 27.69. Зависимости магнитной индукции в сплавах Fe—Co от содержания кобальта и индукции внешнего магнитного поля при T=20°С [3]

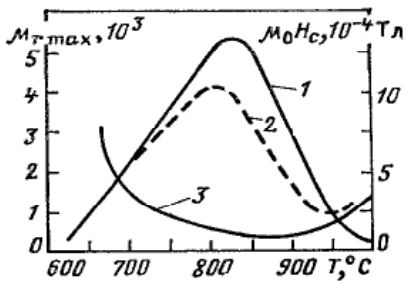


Рис. 27.71. Зависимости максимальной относительной магнитной проницаемости и коэрцитивной силы пермендюра (массовый состав: 49% Fe, 49% Co, 2% V) от температуры отжига:

1 — μ_{rmax} после быстрого охлаждения; *2* — μ_{rmax} после медленного охлаждения; *3* — $\mu_0 H_c$, после быстрого охлаждения [3]

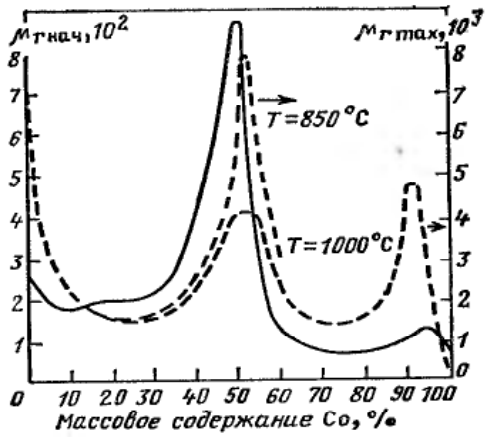


Рис. 27.70. Начальная и максимальная относительные магнитные проницаемости сплавов Fe—Co в зависимости от содержания кобальта и температуры отжига [3]

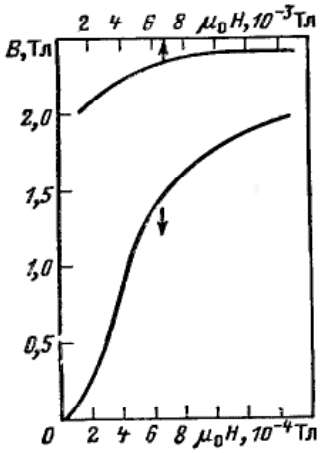


Рис. 27.72. Кривые намагничивания пермендюра (массовый состав: 49% Fe, 49% Co, 1,82% V) [3]

Материалы с малыми потерями при перемагничивании. В эту группу материалов входят многочисленные марки железокремнистых электротехнических сталей с массовым содержанием кремния от 0,4 до 5% (табл. 27.22—27.26, см. также рис. 27.40, 27.52 и табл. 27.7); сюда относится также ряд аморфных магнитных материалов (см. ниже).

Здесь приведены кривые намагничивания и зависимости удельных потерь при перемагничивании от амплитуды перемагничивающего поля для сталей (рис. 27.73—27.79).

Цифры в четырехзначных марках электротехнических сталей означают: первая — вид прокатки и структурное состояние (1 — горячекатаная изотропная, 2— холоднокатаная изотропная, 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой); вторая — массовое содержание кремния, % [0—до 0,4 (нелегированная). 1— от 0,4 до 0,8, 2 — от 0,8 до 1,8, 3 — от 1,8 до 2,8, 4— от 2,8 до 3,8, 5 — от 3,8 до 4,8]; третья — основную нормируемую характеристику (0 — удельные потери на B=1,7 Тл, т. е. $P_{1,7/50}$; 1 — удельные потери на частоте перемагничивающего поля 50 Гц при амплитуде те перемагничивающего поля 50 Гц при амплитуде B=1,5 Тл, т. е. $P_{1.5/50}$; 2 — удельные потери на частоте перемагничивающего поля 400 Гц при амплитуде B=1,0 Тл, т. е. $P_{1.0/400}$; 6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при H=0,4 А/м, т. е. $B_{0,4}$; 7 — магнитная индукция в средних магнитных полях при H=10 А/м, т. е. B_{10}); четвертая — порядковый номер типа стали.

Тип стали определяется первыми тремя цифрами марки.

Таблица 27.22. **Магнитные свойства тонколистовой электротехнической холоднокатаной анизотропной стали [15]**

Марка	Толщина, мм	P, Вт/кг, не более			B, Тл, при H, А/м		
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	100	250	2500
3411	0,50	1,10	2,45	3,20	—	—	1,75
	0,35	0,80	1,75	2,50	—	—	1,75
3412	0,50	0,95	2,10	2,80	—	—	1,85
	0,35	0,70	1,50	2,20	—	—	1,85
3413	0,50	0,80	1,75	2,50	—	—	1,85
	0,35	0,60	1,30	1,90	—	—	1,85
	0,30	—	1,19	1,75	—	—	1,85
3414	0,50	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,88
	0,35	0,50	1,10	1,60	1,60	1,70	1,88
	0,30	—	1,03	1,50	1,60	1,70	1,88
	0,28	—	1,05	1,55	—	—	1,85
3415	0,35	0,46	1,03	1,50	1,61	1,71	1,90
	0,28	—	0,95	1,38	1,61	1,71	1,90
3416	0,28	—	0,89	1,30	1,61	1,70	1,90

Таблица 27.23. **Свойства тонколистовой электротехнической холоднокатаной изотропной стали [16]**

Марка	Толщина, мм	P, Вт/кг, не более		B, Тл, при H, А/м				
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	1000	2500	5000	10 000	130 000
2011	0,65	3,8	9,0	1,48	1,60	1,70	1,80	2,02
	0,50	3,5	8,0	1,49	1,60	1,70	1,80	2,02
2012	0,65	3,6	8,0	1,50	1,62	1,72	1,82	2,02
	0,50	2,9	6,5	1,50	1,62	1,72	1,82	2,02
2013	0,65	3,1	7,0	1,53	1,64	1,74	1,85	2,05
	0,50	2,5	5,6	1,54	1,65	1,75	1,85	2,05
2111	0,65	4,3	10,0	1,45	1,58	1,66	1,75	2,00
	0,50	3,5	8,0	1,46	1,58	1,67	1,78	2,00
2112	0,65	3,5	8,0	1,46	1,59	1,67	1,77	2,02
	0,50	2,6	6,0	1,46	1,60	1,68	1,77	2,02
2211	0,65	3,0	7,0	1,40	1,56	1,65	1,73	1,96
	0,50	2,6	5,8	1,40	1,56	1,65	1,76	2,00
2212	0,65	2,6	6,3	1,42	1,58	1,67	1,77	2,00
	0,50	2,2	5,0	1,42	1,60	1,68	1,77	2,00
2311	0,65	2,5	5,8	1,36	1,52	1,62	1,72	1,96
	0,50	1,9	4,4	1,38	1,54	1,64	1,74	1,96

Продолжение табл. 27.23

Марка	Толщина, мм	P, Вт/кг, не более		B, Тл, при H, А/м				
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	1000	2500	5000	10 000	130 000
2312	0,65	2,4	5,6	1,38	1,54	1,64	1,72	1,96
	0,50	1,75	4,0	1,40	1,56	1,66	1,74	1,96
2411	0,50	1,6	3,6	1,37	1,49	1,60	1,73	1,96
	0,35	1,3	3,0	1,37	1,50	1,60	1,70	1,95
2412	0,50	1,30	3,1	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95
	0,35	1,15	2,5	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95

Таблица 27.24. **Свойства тонколистовой электротехнической горячекатаной изотропной стали [10]**

Марка	Толщина, мм	P, Вт/кг, не более		B, Тл, при H, А/м				
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	1000	2500	5000	10 000	30 000
1211	1,00	5,8	13,4	—	1,53	1,63	1,76	2,00
	0,50	3,3	7,7	—	1,53	1,64	1,76	2,00
1212	1,00	5,4	12,5	—	1,53	1,62	1,76	2,00
	0,65	3,4	8,0	—	1,50	1,62	1,75	1,98
	0,50	3,1	7,2	—	1,50	1,62	1,75	1,98
1213	1,00	4,7	10,7	—	1,50	1,62	1,75	1,98
	0,65	3,2	7,5	—	1,50	1,62	1,75	1,98
	0,50	2,8	6,5	—	1,50	1,62	1,75	1,98
1311	0,50	2,5	6,1	—	1,48	1,59	1,73	1,95
1312	0,50	2,2	5,3	—	1,48	1,59	1,73	1,95
1313	0,50	2,1	4,6	—	1,48	1,59	1,73	1,95
1411	0,50	2,0	4,4	—	1,46	1,57	1,72	1,94
	0,35	1,6	3,6	—	1,46	1,57	1,71	1,92
1412	0,50	1,8	3,9	—	1,46	1,57	1,71	1,92
	0,35	1,4	3,2	—	1,46	1,57	1,71	1,92
1413	0,50	1,55	3,5	—	1,48	1,59	1,73	1,94
	0,35	1,35	3,0	—	1,48	1,59	1,73	1,94
1511	0,50	1,55	3,5	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90
	0,35	1,35	3,0	1,30	1,46	1,57	1,70	1,90
1512	0,50	1,40	3,1	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89
	0,35	1,20	2,8	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89
1513	0,50	1,25	2,9	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
	0,35	1,05	2,5	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
1514	0,50	1,15	2,7	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89
	0,35	0,90	2,2	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89

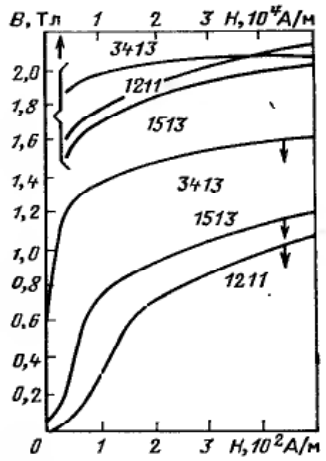


Рис. 27.73. Кривые намагничивания электротехнических сталей разных марок [25]

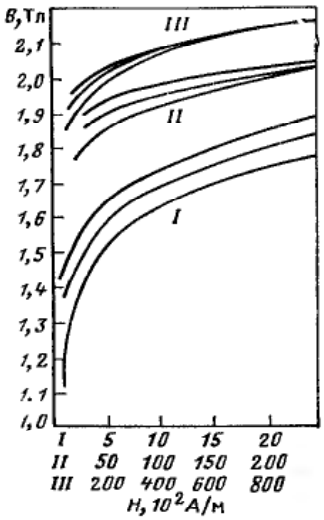


Рис. 27.74. Кривые намагничивания электротехнических сталей марок 3411 (нижние), 3412 (средние), 3413 (верхние)

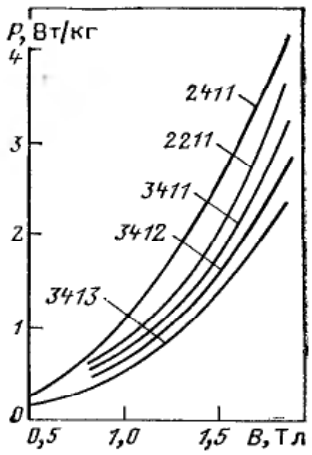


Рис. 27.75. Зависимость удельных потерь от амплитуды перемагничивающего поля при перемагничивании электротехнических сталей разных марок [25]

Таблица 27.25. Магнитные свойства стали марки 1521 [10]

Толщина, мм	P, Вт/кг		B, Тл, при H, А/м		
	$P_{0,75/400}$	$P_{1,0/400}$	500	1000	2500
0,35	10,7	19	1,21	1,30	1,44
0,22	8,0	14,0	1,20	1,29	1,42
0,2	7,2	12,5	1,20	1,29	1,42
0,1	6	10,5	1,19	1,28	1,40

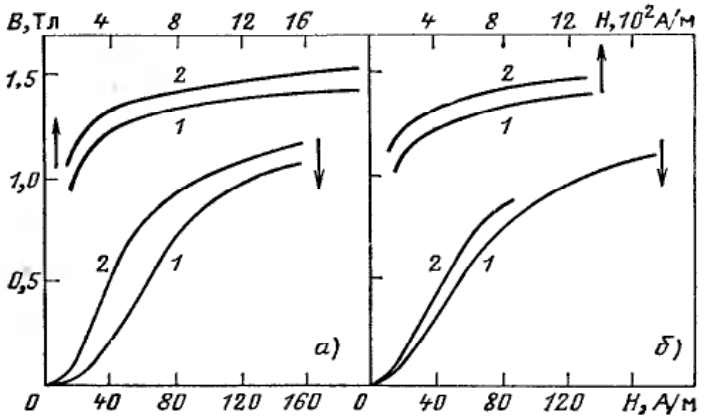


Рис. 27.76. Кривые намагничивания электротехнической стали марки 1521 при толщине образца 0,35 мм (*а*) и 0,2 мм (*б*). На частоте перемагничивающего поля 400 Гц (*1*) и 50 Гц (*2*) [25]

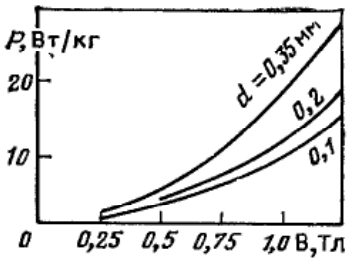


Рис. 27.77. Зависимость удельных потерь при перемагничивании электротехнической стали марки 1521 от амплитуды магнитной индукции при различной толщине образцов [25]

Таблица 27.26. **Магнитные свойства ленты холоднокатаной рулонной анизотропной стали [11]**

Марка	Толщина, мм	P, Вт/кг		H_c, А/м, не более	B, Тл, при H, А/м					
		$P_{1,0/400}$	$P_{1,5/400}$		40	80	200	400	1000	2500
3421	0,20	—	—	28	0,50	0,85	1,10	1,35	1,45	1,70
	0,15	10,0	23,0	34	0,50	0,80	1,10	1,30	1,45	1,70
	0,08	10,0	22,0	36	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
	0,05	10,0	21,0	36	0,40	0,75	1,10	1,25	1,45	1,70
3422	0,15	9,0	20,0	32	0,60	0,95	1,25	1,40	1,55	1,75
	0,08	8,5	19,0	32	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
	0,05	8,5	19,0	36	0,55	0,90	1,25	1,35	1,55	1,75
3423	0,15	8,0	19,0	26	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,08	7,5	17,0	28	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
	0,05	—	17,0	—	0,80	1,05	1,40	1,50	1,65	1,82
3424	0,15	—	18,0	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,08	—	16,0	—	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
	0,05	7,5	16,0	32	0,80	1,10	1,40	1,55	1,65	1,82
3425	0,15	—	17,0	—	1,10	1,35	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,08	—	15,0	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82
	0,05	—	15,0	—	1,05	1,30	1,50	1,65	1,75	1,82
		$P_{1,7/400}$	$P_{1,5/400}$							
3411	0,20	2,2	1,5	28	0,50	0,85	1,10	1,35	1,45	1,70

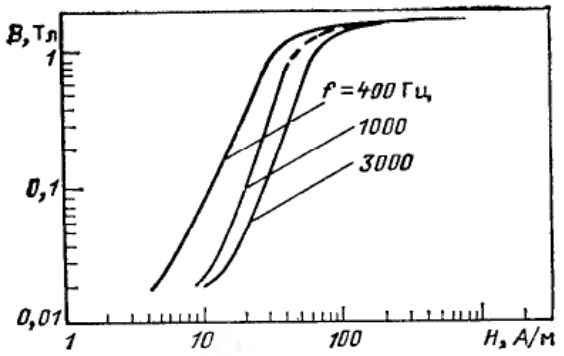


Рис.27.78. Кривые намагничивания ленты из стали марки 3424 толщиной 0,08 мм при различных частотах перемагничивающего поля [25]

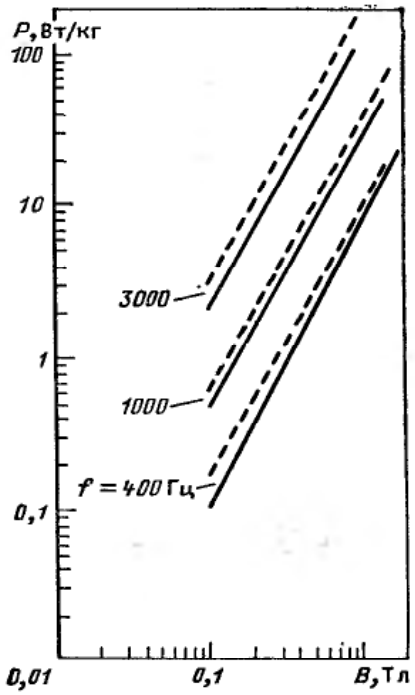


Рис. 27.79. Зависимости потерь от амплитуды магнитной индукции для ленты из стали марки 3424 при различных частотах перемагничивающего поля:

сплошные линии — толщина ленты 0,08 мм, пунктир — 0,15 мм [25]

Материалы с наибольшей проницаемостью в слабых полях. Наибольшей проницаемостью в слабых полях обладают некоторые марки электротехнических сталей (табл. 27.27, рис. 27.80) и железоникелевые сплавы, так называемые пермаллои (табл. 27.28, рис. 27.81—27.83, см. также рис. 27.38, 27.44, 27.48, 27.49), а также некоторые аморфные материалы (см. ниже). Подробные данные об этих сплавах можно найти в справочнике [28].

Таблица 27.27. **Магнитные свойства электротехнических сталей с наибольшей проницаемостью в слабых полях [10] (удельное электрическое сопротивление $6 \cdot 10^{-7}$ Ом·м)**

Марка	Толщина, мм	B, Тл, не менее, при H, А/м		
		0,2	0,4	0,8
1561	0,35	0,00010	0,00022	0,00065
	0,20	0,00010	0,00023	0,00060
	0,35	0,00012	0,00028	0,00076
	0,20	0,00012	0,00030	0,00075

Марка	Толщина, мм	10	20	50	70	100	200	500	1000
1571	0,20	0,030	0,10	0,38	0,58	0,66	0,90	1,18	1,29
	0,35	0,035	0,14	0,48	0,61	0,77	0,92	1,21	1,30
1572	0,20	0,040	0,14	0,48	0,62	0,74	0,92	1,20	1,29
	0,35	0,045	0,17	0,57	0,71	0,87	1,02	1,25	1,30

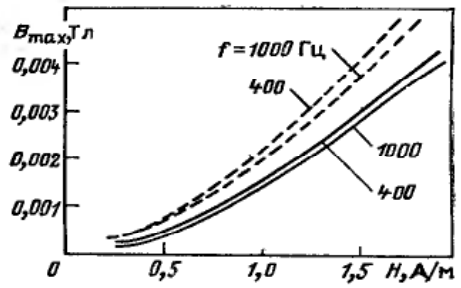


Рис. 27.80. Зависимости максимальной индукции от действующего значения напряженности поля для сталей марок 1561 (пунктир) и 1562 (сплошные кривые) на частотах перемагничивающего поля 400 и 1000 Гц [27]

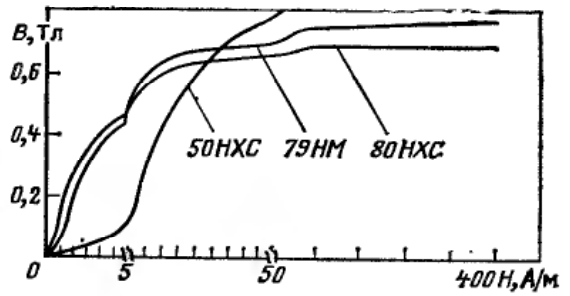


Рис. 27.81. Кривые намагничивания сплавов различных марок [27]

Таблица 27.28. **Магнитные свойства некоторых железоникелевых сплавов [8]**

Марка	Толщина или диаметр, мм	Проницаемость		H_c, А/м	B_s, Тл
		$\mu_{r\,нач}$	$\mu_{r\,max}$		
45Н	0,02—0,04	1700	16 000	32	
	0,35—2,5	2800	25 000	16	1,5
	3—22	2000	18 000	24	
65НП	0,02—0,04	300—1500	70 000	6,4	
	0,10—0,18	500—2000	200 000	2,8	
	0,35—0,50	500—2000	300 000	2,4	1,3
	0,005	10 000	35 000	6,4	
79НМ	0,1—0,15	22 000	150 000	1,2	
	1,5—2,0	25 000	180 000	1,2	0,73—0,75
	3—22	20 000	80 000	3,2	
50НХС	0,02—0,04	1500	15 000	20	
	0,1—0,18	2500	25 000	13	1,0
	0,55—1,0	3000	20 000	10	
80НХС	0,005	8000	30 000	8	
	0,1—0,15	22 000	120 000	2,4	
	1,5—2,5	25 000	150 000	1,2	0,63
	3—22	20 000	70 000	3,2	

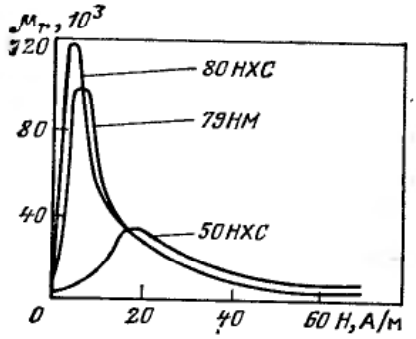


Рис. 27.82. Зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности поля для сплавов различных марок [27]

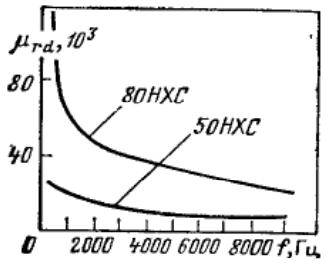


Рис. 27.83. Зависимости относительной магнитной проницаемости от частоты перемагничивающего поля для сплавов различных марок [27]

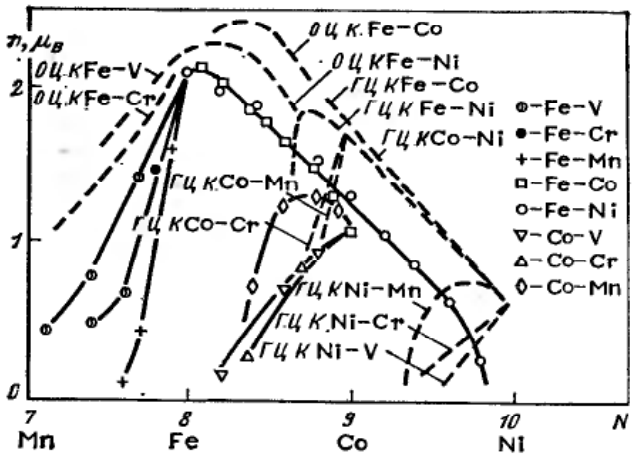


Рис. 27.84. Атомные магнитные моменты (в расчете на атом переходного элемента) квазибинарных аморфных сплавов $(L_xM_{1-x})_{80}\ P_{10}\ B_{10}$ (L, M — переходные элементы) — сплошные кривые, соединяющие экспериментальные точки:
N — среднее число внешних s- и d-электронов в атомах переходных элементов; пунктир — результаты для соответствующих кристаллических сплавов, не содержащих P и B [82]

Аморфные магнитные материалы. Особую группу магнитомягких материалов образуют аморфные металлические материалы, получаемые с помощью специальных технологий. Известны два типа таких материалов: аморфные сплавы металлов группы железа (см. п. 27.3.1) с добавкой 10—20% (атомное содержание) таких металлоидов, как B, C, N, Si, P, и аморфные сплавы переходных металлов с редкоземельными. Приводятся данные только о материалах первого типа (табл. 27.29, 27.30), так как они находят применение в качестве материалов с малыми потерями при перемагничивании и большой магнитной проницаемостью в слабых полях (см. выше). Данные о материалах второго типа можно найти в [56]. Результаты, изложенные в этом параграфе, взяты из [82]. Аморфные сплавы отечественного производства описаны в справочнике [28].

На рис. 27.84—27.87 даны графики зависимостей спонтанного магнитного момента и индукции насыщения от состава сплавов и температуры, а также температуры Кюри от состава сплавов. На рис. 27.84 и 27.86 величина N, отложенная на оси абсцисс, соответствует составу сплавов. Рисунок 27.88 дает представление о магнитострикции в материалах разных составов. На рис. 27.89, 27.90 приведены важные для применений характеристики начальной проницаемости и потерь при перемагничивании.

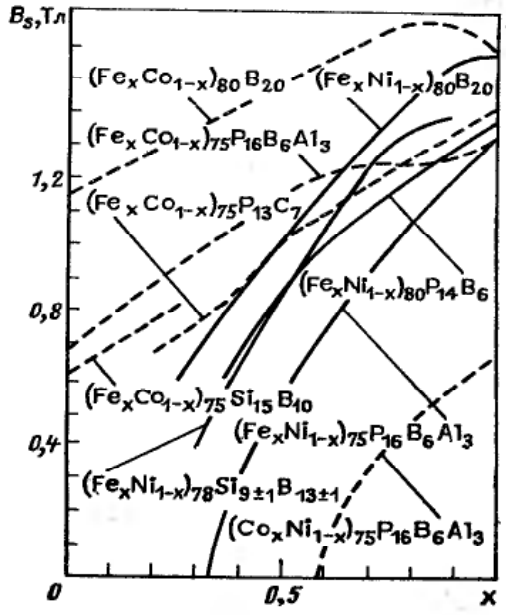


Рис. 27.85. Зависимости индукции насыщения при T = =20°C от состава аморфных сплавов Fe, Co и Ni [82]

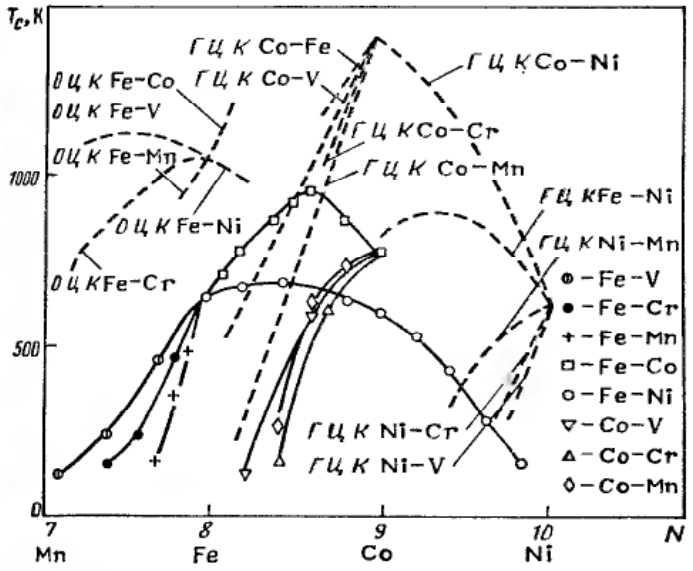


Рис. 27.86. Температуры Кюри квазибинарных аморфных сплавов $(L_xM_{1-x})_{80}P_{10}B_{10}$ (L и M — переходные элементы) в зависимости от среднего числа N внешних s- и d-электроиов атомов переходных элементов — сплошные кривые; пунктириые кривые — даиные для кристаллических сплавов, не содержащих P и B [82]

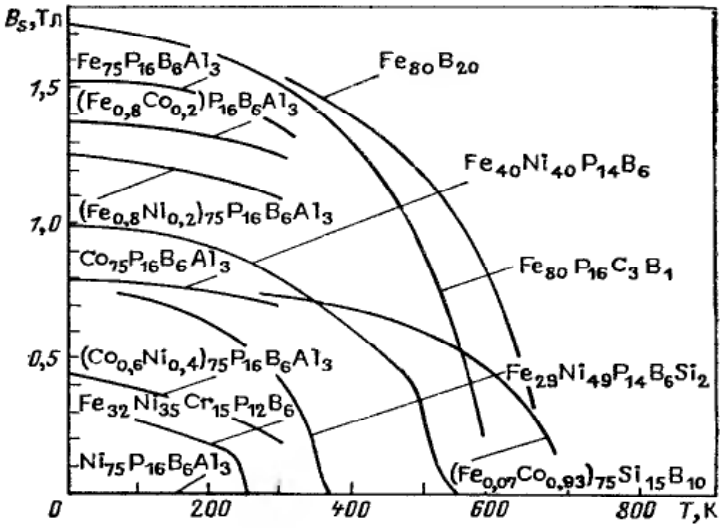


Рис. 27.87. Температурные зависимости индукции насыщения для различных аморфных сплавов (см. табл. 27.29 и 27.30) [82]

Таблица 27.29. **Статические магнитные свойства некоторых аморфных сплавов** [82]

Сплав	Форма образца	Отожженные образцы			Неотожженные образцы		
		$\mu_0 H_c$, 10^{-4} Тл	J_r/J_S	$\mu_{r\,max}$, 10^3	$\mu_0 H_c$, 10^{-4} Тл	J_r/J_S	$\mu_{r\,max}$, 10^3
$Fe_{80}B_{20}$	т	—	—	—	0,075	0,46	—
	т	0,08	0,51	100	0,04	0,77	300
$Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$	т	0,06	0,45	58	0,02	0,71	275
	л	0,010	0,90	—	0,009	0,89	—
	т	0,05	0,45	70	0,01	0,71	550
$Fe_{29}Ni_{49}P_{14}B_6Si_2$	л	0,01	0,8	—	0,03P	0,995P	—
	т	0,057	0,54	46	0,011	0,70	310
$Fe_3Co_{72}P_{16}B_6Al_3$	т	0,023	0,45	120	0,013	0,71	340
$Fe_{4,7}Co_{70,3}Si_{15}B_{10}$	л	0,013	0,36	190	0,006	0,63	700
	л	0,01	0,35	230	0,015	0,82	370
$Fe_{80}P_{13}C_7$	л	0,08	0,42	74	0,018	0,36	280
	т	0,12	0,42	42	0,06	0,4	80
$(Fe_{0,8}Ni_{0,2})_{78}S_{10}B_{12}$	л	0,04	0,44	145	0,015	0,93	800
$(Fe_{0,8}Ni_{0,2})_{78}S_8B_{14}$	л	0,018	0,41	300	0,006	0,95	2000
$(Fe_{0,6}Ni_{0,4})_{78}S_8B_{14}$		0,022	0,44	210	0,006	0,97	1700
$(Fe_{0,4}Ni_{0,6})_{78}S_8B_{14}$	л	0,024	0,46	120	0,005	0,76	950
$Fe_{80}P_{16}C_3B_1$	л	0,080	—	—	0,068	—	—
	т	0,062	0,40	96	0,050	0,42	130

Примечание. Здесь т — тороид, л — лента, P — образец отожжен под растяжением.

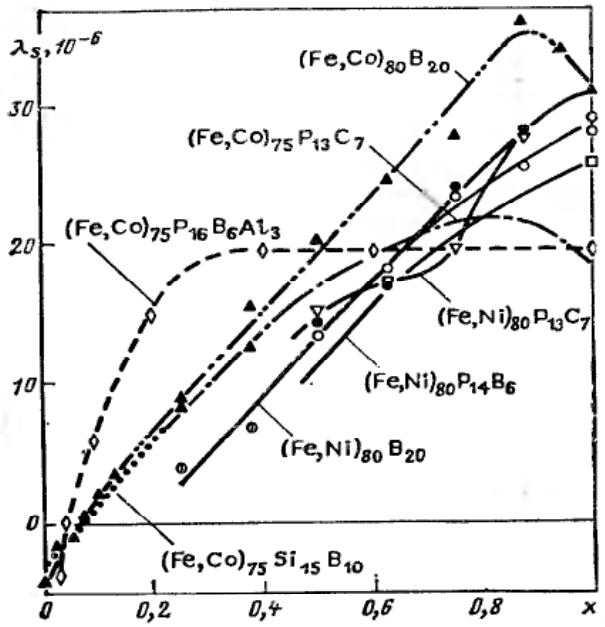


Рис. 27.88. Зависимости магнитострикции насыщеиия от состава некоторых аморфных сплавов $(Fe_xM_{1-x})_{75-80}(P, B, C)_{25-20}$ (здесь M—Co или Ni) [82]

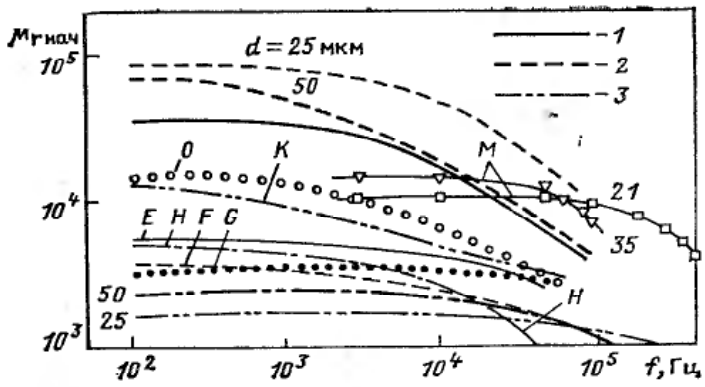


Рис. 27.89. Типичные зависимости относительной начальной магнитной проницаемости от частоты перемагничивающего поля для некоторых аморфиых и поликристаллических сплавов при различной толщине образцов: даиные для аморфных сплавов помечены буквами, соответствующими табл. 27.30; *1* и *2* — пермаллой (массовый состав: 4% Mo, 79% Ni, остальное Fe) и супермаллой (массовый состав: 4% Mo, 80% Ni, остальиое Fe, закругленная петля гистерезиса); *3* — силектрон (текстурованная электротехническая сталь, содержащая 3,2% Si по массе) [82]

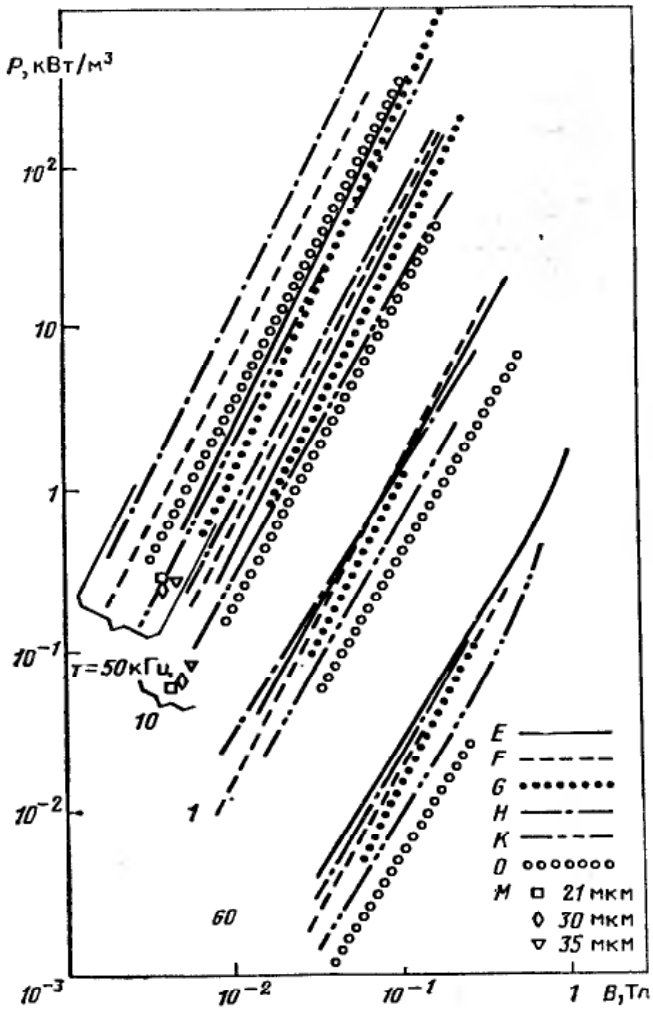


Рис. 27.90. Зависимости удельных потерь от амплитуды магнитной индукции для некоторых аморфных сплавов при различных частотах перемагничивающего поля. Буквеиные обозначения сплавов соответствуют табл. 27.30. Толщины образцов 25—50 мкм [82]. Кривые около цифры 60 получены при частоте 60 Гц

Таблица 27.30. **Удельные потери при перемагничивании в неотожженных и отожженных образцах аморфных сплавов [82]**

Сплав	Обозначение на рис. 27.89 и 27.90	10^3 ρ, кг/м³	Потери при B_{max} = 0,1 Тл, кВт/м³								Толщина ленты, мкм	Отожженные образцы	
			Неотожженные образцы для частот, кГц				Отожженные образцы для частот, кГц					$\mu_0 H_c$, 10^{-4} Тл	J_r/J_s
			0,060	1	10	50	0,060	1	10	50			
$Fe_{80}B_{20}$	—	7,39	0,071	2,8	65	—	0,030	1,1	18	—	30—35	0,040	0,78
	E	—	0,10	5	350	1000	0,025	1,2	35	200	30	0,075	0,46
$Fe_{80}P_{16}C_3B_1$	—	7,7	—	8,5	310	—	—	6,3	160	—	40	0,050	0,42
$Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$	—	7,5—7,7	—	13	250	—	—	1,8	42	—	50	0,019	0,58
	K		0,07	4	400	3000	0,010	0,60	18	180	50	0,020	0,70
$Fe_{29}Ni_{49}P_{14}B_6Si_2$	—	7,51	—	10	160	—	—	0,75	20	—	70	0,011	0,70
$Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$	*F*	7,14	0,07	4	450	2300	0,016	1,2	45	600	30	0,090	0,68
$Fe_{80}P_{14}B_6$	*G*	6,86	0,04	2,5	80	950	0,014	1,1	28	200	25	0,1	0,37
$Fe_{50}Ni_{30}P_{14}B_6$	*H*	7,65	0,09	5	380	1700	0,022	1,2	50	1000	30	0,050	0,84
$Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$	—	7,5—7,7	0,06	5,5	550	1300	0,014	0,92	49	820	36	0,035	0,85
$Fe_5Co_{70}S_{15}B_{10}$	*M*	8,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,010	0,85
$Fe_3Co_{72}P_{16}B_6Al_3$	*O*	7,3	0,025	1	28	190	0,006	0,35	16	230	20	0,015	0,82

Материалы со специальными магнитными **свойствами** и **магнитострикционные материалы**. Здесь приведены данные о сплавах (табл. 27.31) с повышенным постоянством магнитной проницаемости в слабых полях ($\mu_{r\,нач}$ неизменна с погрешностью 1—5% в интервале H от 0 до 300 А/м), типичные характеристики одного из термомагнитных материалов (рис. 27.91), а также сведения о магнитострикционных материалах (табл. 27.32). В первую из этих групп входят в основном железоникель-кобальтовые сплавы (см. также рис. 27.43 и табл. 27.12), подвергнутые отжигу (перминвар) или термомеханической обработке (изоперм), а во вторую — железоникель-хромовые (компенсатор) (рис. 27.91), железоникелевые (термаллой), никель-медные (кальмаллой) сплавы. Сведения об интерметаллидах редкоземельный элемент — железо (перспективных магнитострикционных материалах) содержатся в п. 27.3.2 (см. табл. 27.13, рис. 27.55, 27.58, 27.63, 27.66—27.68). Магнитные материалы со специальными свойствами детально описаны в справочнике [28].

Продолжение табл. 27.31

Марка	Толщина, мм	$\mu_{r\,нач}$	$\frac{\mu_{r\,max}}{\mu_{r\,нач}}$	$\alpha_п$ при H=800 А/м	$\frac{d\mu_r/dT}{10^{-2}\,°C^{-1}}$ (T = —60 °C ÷ ÷ +120° C)
64Н	0,01—0,1	2000—2200	1,2	0,07	0,06
40НКМ	0,01—0,1	1800	1,2	0,07	—

Примечание. Здесь $\alpha_п = B_r/B_{max}$ — коэффициент прямоугольности петли гистерезиса, $d\mu_r/dT$ — температурный коэффициент проницаемости.

Таблица 27.31. **Магнитные свойства холоднокатаной ленты сплавов с низкой остаточной индукцией и повышенным постоянством магнитной проницаемости [8]**

Марка	Толщина, мм	$\mu_{r\,нач}$	$\frac{\mu_{r\,max}}{\mu_{r\,нач}}$	$\alpha_п$ при H=800 А/м	$\frac{d\mu_r/dT}{10^{-2}\,°C^{-1}}$ (T = —60 °C ÷ ÷ 120 °C)
47НК	0,01—0,1	900—1100	1,15	0,05	0,06
47НКХ	0,02—0,1	1500	1,2	0,05	0,03

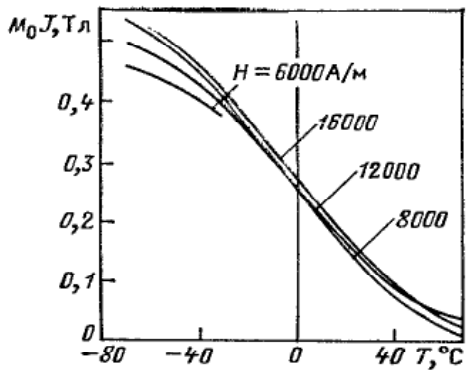


Рис. 27.91. Термомагнитные характеристики сплава марки 32НХ2Ю при различных значениях напряженности внешнего магнитного поля [28]

Таблица 27.32. **Основные характеристики металлических магнитострикционных материалов*** [5] (обозначения см. в § 27.1)

Материал и его марка	Химический состав	ρ, 10^3 кг/м^3	E, 10^{11} Н/м^2	Скорость звука $c_{зв}$, 10^3 м/с	μ_r	Тангенс магнитных потерь tg β, 10^3	$H_{опт}$, 10^3 А/м	a, 10^7 Н/(м^2 · Тл)	K	Λ, 10^{-9} Тл · м^2/Н
Никель НП2Т	Ni более 98%	8,9	2,15	4,9	35	60	1—2	2,3	0,26—0,3	4,2
Сплав NiCo	4% Co, остальное Ni	8,9	2,15	4,9	—	55	2	2,7	0,43—0,5	—
Сплав NiCo	2,3% Cr, 1,4% Co, остальное Ni	8,8	2,25	5,0	—	—	2,5	2,9	0,37	—
Сплав никоси	4% Co, 2% Si, остальное Ni	8,8	1,9	4,8	210	—	0,4—0,6	1,8	0,49	28
Сплав пермендюр 49КФ	49% Co, 2%V, остальное Fe	8,2	2,05	5,2	200	400	0,4—0,6	2,2	0,48—0,54	27
Сплав 65К	65% Co, остальное Fe	8,2	2,05	5,2	70	500	1—1,7	1,5	0,27—0,30	7
Сплав алфер 14Ю	14% Al, остальное Fe	6,6	1,63	5,0	110	60	0,3—0,6	1,15	0,26	15
Сплав алфер 12Ю	12,4% Al, остальное Fe	6,7	1,58	4,8	30	30	0,3—0,6	0,85	0,30	20

Продолжение табл. 27.32

Материал и его марка	Химический состав	Q	$\rho_{эл}$, 10^{-7} Ом · м	H_c, 10^2 А/м	B_s, 10^{-1} Тл	λ_s, 10^{-6}	T_C, °С	$\lambda_s E$, 10^5 Н/м^2	Усталостная динамическая прочность $\sigma_{дин}$, 10^5 Н/м^2	Предел прочности $\sigma_{пр}$, 10^5 Н/м^2	Предел текучести $\sigma_т$, 10^5 Н/м^2
Никель НП2Т	Ni более 98%	750	0,7	1,7	6,1	—37	360	40	1000	3600	1000
Сплав NiCo	4% Co, остальное Ni	—	1,0	—	7,0	—36	410	41	1000	—	—
Сплав NiCo	2,3% Cr, 1,4% Co, остальное Ni	—	3,0	—	4,8	—33	260	37	—	—	—
Сплав никоси	4% Co, 2% Si, остальное Ni	—	1,8	0,17—0,25	6,2	(—25)—(—27)	350	26—28	—	4200	850
Сплав пермендюр 49КФ	49% Co, 2% V, остальное Fe	600	3,4	1,4	24,0	+70	980	80	1100	5000	3500
Сплав 65К	65% Co, остальное Fe	600	0,8	1,0	22,0	+90	980	90	—	6700	4500
Сплав алфер 14Ю	14% Al, остальное Fe	300	12	0,25	12,0	+40	500	34	—	7500	5500
Сплав алфер 12Ю	12,4% Al, остальное Fe	400	16	0,1	16,0	+40	600	34	300	8000	6000

* Ссылка на материалы на основе интерметаллических соединений редкоземельных металлов приведена перед табл. 27.31.

27.4.2. Магнитотвердые материалы. Для изготовления постоянных магнитов применяются материалы следующих основных групп: легированные углеродистые стали (табл. 27.33), характеризующиеся умеренными значениями коэрцитивной силы H_c и максимальной плотности магнитной энергии $(BH)_{max}$; железоникель-алюминиевые дисперсионно-твердеющие сплавы (типа альнико, тикональ, альни, табл. 27.34), деформируемые железокобальт-хромовые (табл. 27.35) и железокобальт-ванадиевые (викаллой, рис. 27.92) сплавы, имеющие повышенные значения указанных характеристик; сплавы платина — кобальт (рис. 27.93) и сплавы на основе интерметаллида $SmCo_5$ (табл. 27.36, рис. 27.94), обладающие большими значениями параметров. Есть сообщения о материале с примерным составом $Nd_{15}Fe_{77}B_8$ [18,99], который имеет еще более высокие характеристики: T_C = =585 К, B_r = 1,23 Тл, H_{cB} = 880 кА/м, H_{cI} = 960 кА/м, $(BH)_{max}$ = 290 кДж/м^3. Этот материал образует тетрагональную кристаллическую решетку с периодами a = = 0,880 нм и c = 1,221 нм, его плотность 7,4 г/см^3.

В марках магнитотвердых сплавов буквы и цифры указывают на массовое содержание, %, алюминия (Ю), ванадия (Ф), вольфрама (В), кобальта (К), меди (Д), молибдена (М), никеля (Н), титана (Т). Буква А обозначает наличие кристаллической текстуры, улучшающей свойства сплава. Подробные данные о большинстве из упомянутых в этом пункте материалов приведены в [28].

Таблица 27.33. **Магнитные характеристики (нижние предельные значения) легированных углеродистых сталей при намагничивании в полях напряженностью H_{max}** [6]

Марка	H_{max}, кА/м	H_c, А/м	B_r, Тл
ЕХ3	39,8	4775	0,95
ЕВ6	39,8	4775	1,00
ЕХ5К5	79,6	7162	0,85
ЕХ9К15М2	79,6	11 937	0,80

Таблица 27.34. **Магнитные характеристики (нижние предельные значения) литых магнитотвердых материалов на основе дисперсионно твердеющих железоникель-алюминневых сплавов** [7]

Марка	$(BH)_{max}$, кДж/м³	H_{cB}, кА/м	B_r, Тл	B/H в точке $(BH)_{max}$, 10^{-3} Тл·м/кА
ЮНД4	7,2	40	0,50	12,0—16,0
ЮНД8	10,2	44	0,60	13,0—16,0
ЮНТС	8,0	58	0,43	7,0—10,0
ЮНДК15	12,0	48	0,75	15,5—18,0
ЮНДК18	19,4	55	0,90	15,0—20,0
ЮНДК18С	28	44	1,10	22,0—28,0
ЮН13ДК24С	36	36	1,30	30,0—33,0
ЮН13ДК24	36	40	1,25	25,0—27,5
ЮН14ДК24	35	48	1,20	20,0—22,0
ЮН15ДК24	36	52	1,15	15,0—17,5
ЮН14ДК24Т2	30	60	1,10	16,0—19,0
ЮН13ДК25А	56	44	1,40	27,5—30,0
ЮН14ДК25А	56	52	1,35	24,0—25,0
ЮН13ДК25БА	56	48	1,40	26,5—27,5
ЮН14ДК25БА	56	58	1,30	21,5—24,0
ЮН15ДК25БА	56	62	1,25	16,5—21,5
ЮНДК31Т3БА	64	92	1,15	11,0—14,0
ЮНДК34Т5	28	92	0,75	8,0—11,0
ЮНДК35Т5Б	32	96	0,75	8,0—10,0
ЮНДК35Т5	36	110	0,75	7,0—8,0
ЮНДК35Т5БА	72	110	1,02	8,0—9,0
ЮНДК35Т5АА	80	115	1,05	8,0—9,0
ЮНДК38Т7	36	135	0,75	4,5—5,5
ЮНДК40Т8	36	145	0,70	3,5—4,5
ЮНДК40Т8АА	64	145	0,90	4,0—5,0

Таблица 27.35. **Магнитные характеристики (нижние предельные значения) магнитотвердых материалов на осиове деформируемых железокобальт-хромовых сплавов** [13]

Марка*	$(BH)_{max}$, кДж/м³	H_{cB}, кА/м³	B_r, Тл
28Х10К	7	20	0,8
38Х10КА	26	38	1,1
25Х15К	10	24	0,9
25Х15КА	32	40	1,2
23Х15К5ФА	36	42	1,25
20Х23К	12	50	0,75
30Х23КА	30	55	1,00

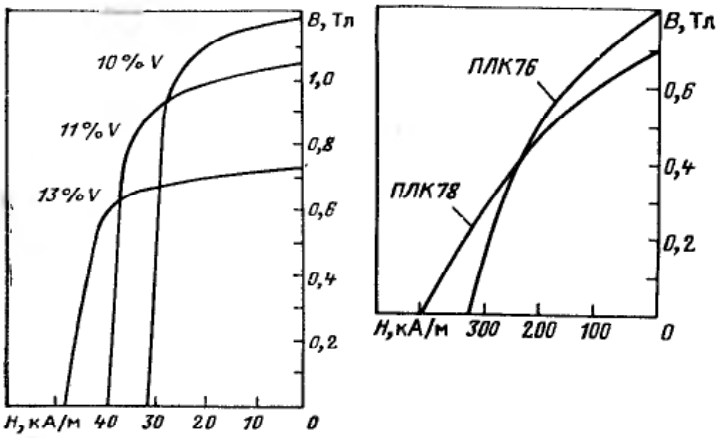


Рис. 27.92. Кривые размагничивания железокобальт-ванадиевого сплава викаллой 52КФ для различного содержания ванадия [27]

Рис. 27.93. Кривые размагничивания платинокобальтовых сплавов [27]

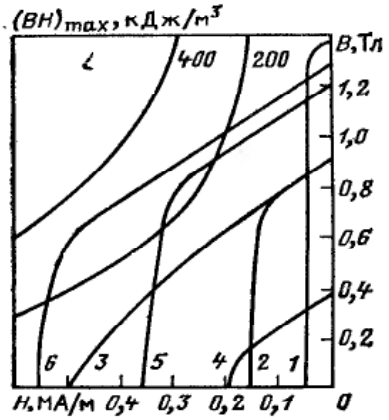


Рис. 27.94. Кривые размагничиваиия и кривые равных значений максимальной плотности магнитной энергии $(BH)_{max}$ для различных магнитотвердых материалов:

1 — ЮН13ДК25БА; *2* — ЮНДК40Т8АА; *3* — КСП37А; *4* — бариевый феррит; *5* и *6* — $Sm_{0,95}$ $Zr_{0,05}$ $(Co_{0,7}$ $Fe_{0,2}$ $Cu_{0,1})_7$ спеченный и литой соответственно [25]

Таблица 27.36. **Основные магнитные характеристики (нижние предельные значения) материалов на основе интерметаллида $SmCo_5$** [12]

Марка	B_r, Тл	H_{cB}, кА/м	$\frac{(BH)_{max}}{2}$, кДж/м³	H_{cJ}, кА/м
КС37	0,77	540	55	1300
КС37А	0,82	560	65	1000
КСП37	0,85	520	65	800
КСП37А	0,90	500	73	640

* К — кобальт, С — самарий, П — празеодим, А — кристаллическая текстура, улучшающая свойства сплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов К. П., Левитин Р. З., Никитин С. А., Педько А. В.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 40. № 6. С. 1562—1569.

2. Бердышев А. А. Введение в квантовую теорию ферромагнетизма: Курс лекций. Ч. 4. Свердловск: Изд-во Уральского гос. ун-та, 1971.

3. Бозорт Р. Ферромагнетизм: Пер. с англ./Под ред Е. И. Кондорского, Б. Г. Лившица. М.: Изд-во иностр. лит., 1956.

4. Вонсовский С. В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.

5. Голямина И. П. Магнитострикционные материалы/ Ультразвук. Маленькая энциклопедия/Под ред. И. П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979. С. 194—195.

6. ГОСТ 6862-71. Прутки из легированной магнитотвердой стали. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1971.

7. ГОСТ 17809-72. Материалы магнитотвердые литые. Марки и технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1972.

8. ГОСТ 10160-75. Сплавы прецизионные магнитномягкие. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1975.

9. ГОСТ 11036-75. Сталь сортовая электротехническая нелегированная. М.: Изд-во стандартов, 1975.

10. ГОСТ 21427.3-75. Сталь электротехническая горячекатаная тонколистовая. М.: Изд-во стандартов, 1975.

11. ГОСТ 21427.4-78. Лента стальная электротехническая холоднокатаная анизотропная. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1978.

12. ГОСТ 21559-76. Материалы магнитотвердые спеченные. Марки, технические требования и методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 1976.

13. ГОСТ 24897-81. Материалы магнитотвердые деформируемые. Марки, технические требования и методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 1981.

14. ГОСТ 3836-83. Сталь электротехническая нелегированная тонколистовая и ленты. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1983.

15. ГОСТ 214271-83. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1983.

16. ГОСТ 21427.2-83. Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1983.

17. Дерягин А. В., Кудреватых Н. В., Башков Ю. Ф./ Труды Международной конференции по магнетизму МКМ-73. М.: Наука, 1974. Т. 1. Ч. 2. С. 222—225.

18. Дерягин А. В., Тарасов Е. Н., Андреев А. В. и др.//Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39, № 11. С. 516—519.

19. Ермоленко А. С., Королев А. В.//Физика металлов и металловедение. 1973. Т. 36, № 1. С. 52—59.

20. Ермоленко А. С.//Труды Международной конференции по магнетизму МКМ-73. М.: Наука, 1974. Т. 1. Ч. 1. С. 231—236.

21. Ермоленко А. С. Магнитные свойства монокристаллов редкоземельных соединений со структурой типа $CaCu_5$//Физические свойства магнитных материалов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982. С. 32—38.

22. Ермоленко А. С. Магнетизм высокоанизотропных редкоземельных соединений типа RCo_5: Дис. на соиск. учен. степ. д-ра физ.-мат. наук. Свердловск: Ин-т физики металлов АН СССР, 1983.

23. Кондорский Е. И., Седов В. Л.//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1960. Т. 38, № 3. С. 773—779.

24. Кудреватых Н. В. Магнитные свойства и магнитная анизотропия некоторых интерметаллических соединений редкоземельных металлов с металлами группы железа типа R_2T_{17}: Дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук. Свердловск: Уральский гос. ун-т, 1977.

25. Мишин Д. Д. Магнитные материалы. М.: Высшая школа, 1981.

26. Рыков Г. А. Металлы, сплавы и металлические изделия//Электротехнические материалы: Справочник. М., Энергоатомиздат, 1983. С. 286—447.

27. Сергеев В. Г. Магнитные материалы//Электротехнический справочник/Под ред. В. Г. Герасимова и др. М.: Энергия, 1980. Т. 1. С. 439—463.

28. Прецизионные сплавы: Справочник/Под ред. Б. В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983.

29. **Abbundi R., Clark A. E.**//J. Appl. Phys. 1978. Vol. 49. № 3. (pt. 2). P. 1969—1971.

30. **American** Institute of Physics Handbook/Ed. by D. E. Gray. N. Y.: McGraw Hill, 1963.

31. **Arajs S., Colvin R. V.**//J. Phys. Chem. Solids. 1963. Vol 24, № 10. P. 1233—1237.

32. **Aubert G.**//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 2 (pt 1). P. 504—510.

33. **Barnier Y., Pauthenet R., Rimet G.**//Compt. rend. Acad. sci. 1961. Vol 252, № 19. P. 2839—2841.

34. **Elliott J. F., Legvold S., Spedding F.**//Phys. Rev. 1958. Vol. 94, № 5. P. 1143—1145.

35. **De Boer F. R., Biesterbos J., Schinkel C. J.**//Phys. Lett. 1967. Vol. 24A, № 7. P. 355—357.

36. **Bower D. I.**//Proc. Roy. Soc. 1971. Vol. A326, № 1564. P. 87—96.

37 **Bozorth R. M.**//J. Appl. Phys. 1937. Vol. 8, № 9. P. 575—588.

38. **Bozorth R. M.**//Rev. Mod. Phys. 1953. Vol. 25, № 1. P. 42—48.

39. **Bozorth R. M.**//Phys. Rev. 1954. Vol. 96, № 2. P. 311—316.

40. **Bozorth R. M., Clark A. E., Van Vleck J. H.**// Intern. J. Magnetism. 1972. Vol. 2, № 1. P. 19—22.

41. **Bozorth R. M., McGuire T. R., Hudson R. P.**//American Institute of Physics Handbook/Ed. by. D. E. Grey. N. Y.: McGraw Hill. 1972. P. 5-139—5-311.

42. **Burzo E.**//Z. Angew. Phys. 1971. Bd. 32. S. 127—130.

43. **Buschow K. H. J.**//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp. 1980. Vol. 1. P. 297—414.

44. **Cable J. W., Wollan E. O.**//Phys. Rev. Vol. 165, № 2. P. 733—734.

45. **Carr W. J.**//Handbook der Physik/Ed. by. S. Flugge. Berlin: Springer-Verlag, 1966. Bd. 18/2. S. 100—200.

46. **Chin G. Y., Wernick J. H.**//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland. Publ. Comp., 1980. Vol. 2. P. 55—188.

47. **Clark A. E., Cullen J., Sato K.**//AIP Conf. Proc. 1975, № 24. N. Y.: Amer. Inst. Phys., P. 192—195.

48. **Clark A. E., Abbundi R., Savage H. T., McMasters O. D.**//Physica. 1977. Vol. 86-88B, pt 1, P. 73—74.

49. **Clark A. E., Abbundi R., Gillmor W. G.**//IEEE Trans. Mag. 1978. Vol. MAG-14. P. 542—545.

50. **Clark A. E.**//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 531—589.

51. **Cohen R. L., Sherwood R. C., Wernick J. H.**//Phys. Lett. 1968. Vol. 26A, № 10. P. 462—463.

52. **Corner W. D., Tanner B. K.**//J. Phys. 1976. Vol. C9, № 4. P. 627—633.

53. **Creveling L., Luo H. L., Knapp G. S.**//Phys. Rev. Lett. 1967. Vol. 18, № 20. P. 851—852.

54. **Cullity B. D.** Introduction to Magnetic Materials. Reding: Addison-Wesley. 1972.

55. **Danan H., Herr A., Meyer A. J. P.**//J. Appl. Phys. 1968 Vol. 39, № 2, pt 1. P. 669—670.

56. **Eschenfelder A. H.**//Ferromagnetic Materials/ Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam. North-Holland Publ. Com., 1980. Vol. 2. P 345—380.

57. **Escudier P.** Ph. D. Thesis. Grenoble Univ. 1973.

(см. в [110]); **Franse J. J. M., de Vries G.**//Physica. 1968. Vol. 39, № 4. P. 477—498.

58. **Feron J. L., Hug G., Pauthenet R.**//Z. Angew. Phys. 1970. Bd. 30, № 1. S. 61—64; **Les Elements** des Terres Rares. Paris: CNRS, 1970. Vol. 2. P. 19—29.

59. **Ferromagnetic materials**/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland, Publ. Comp., 1980. Vol. 1, 2.

60. **Gardner W. E., Smith T. F., Howlett B. W. e. a.**// Phys. Rev. 1968. Vol. 166, № 2. P. 577—588.

61. **Gersdorf R.** Ph. D. Thesis Amsterdam Univ., 1961 (см. в [110]).

62. **Graham C. D., Jr.**//Phys. Rev. 1958. Vol. 112 № 4. P. 1117—1120.

63. **Green R. W., Legvold S., Spedding F. H.**//Ibid. 1961. Vol. 122, № 3. P. 827—830.

64. **Hall R. C.**//J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30, № 6 p. 816—819.

65. **Hall R. C.**//Trans. Metallurg. Soc. AIME. 1960. Vol. 218. P. 268—271.

66. **Hegland D. E., Legvold S., Spedding F. H.**//Phys. Rev. 1963. Vol. 131, № 1. P. 158—162.

67. **Honda K., Kaya S.**//Sci. Repts Tohoku Univ. 1926. Vol. 15. P. 721—724.

68. **Honda K., Masumoto H., Kaya S.**//Ibid. 1928. Vol. 17. P. 111—114.

69. **Honda K., Masumoto H.**//Ibid. 1931. Vol. 20 P. 322—325.

70. **Hubert A., Unger W., Kranz J.**//Z. Phys. 1969 Bd. 224, № 1—3. S. 148—155.

71. **Huray P. G., Nave S. E., Peterson J. R., Haire R. G.**//Physica 1980. Vol. 102B, № 1—3. P. 217—220.

72. **Kase T.**//Sci. Repts Tohoku Univ. 1927. Vol. 16. P. 491—494.

73. **Kaya S.**//Ibid. 1928. Vol. 17. P. 639—642.

74. **Kaya S.**//Ibid. 1928. Vol. 17. P. 1157—1160.

75. **Klein H. P., Menth A., Perkins R. S.**//Physica. 1975. Vol. 80B, № 1—4. P. 153—163.

76. **Laforest J., Lemaire R., Pauthene R., Schweizer J.**// Compt. rend. Acad. sci. 1966. Vol. B262, № 19. P. 1260—1263.

77. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte and Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Technik. Berlin: Springer-Verlag, 1962. Bd. 2. Teil 9.

78. **Lee E. W., Asgar M. A.**//Proc. Roy. Soc. 1971. Vol. A326, № 1564. P. 73—85.

79. **Legvold S., Alstad J., Rhyne J.**//Phys. Rev. Lett. 1963. Vol. 10, № 12. P. 509—511.

80. **Legvold S.** Rare Earth Metals and Alloys//Ferromagnetic Materials//Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 183—295.

81. **Littman M. F.**//IEEE Trans. Mag. 1971. Vol. MAG-7. P. 48—51.

82. **Luborsky P. E.**//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 451—530. (См. также **Хандрих К., Кобе С.** Аморфные ферро- и ферримагнетики: Пер. с нем. М.: Мир, 1982.)

83. **Mattias B. T., Bozorth R. M.**//Phys. Rev. 1958. Vol. 169. P. 604—605.

84. **Mattias B. T., Clogston A. M., Williams H. J. e. a.**// Phys. Rev. Lett. 1961. Vol. 7, № 1. P. 7—9.

85. **Mattocks P. G., Melville D.**//J. Phys. F: Metal Phys. 1978. Vol. 8, № 6. P. 1291—1302.

86. **McEwen K. A.**//Handbook of the Physics and Chemistry of Rare Earth/Eds. K. A. Gschneider, L. Eyring. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1978. Ch. 6.

87. **Mihai V., Franse J. J. M.**//Rev. Roum. Phys. 1976. Vol. 21. P. 1041—1044.

88. **Mishima A., Fuju H., Okamoto T.**//J. Phys. Soc. Jap. 1976. Vol. 40, № 4. P. 962—967.

89. **Mydosh J. A., Nieuwenhuys G. J.**//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 71—182.

90. **Myers H. P., Sucksmith W.**//Proc. Roy. Soc. 1951. Vol. A207, № 1091. P. 427—446.

91. **Nakagawa Y.**//J. Phys. Soc. Jap. 1956. Vol. 11, № 8. P. 855—863.

92. **Nigh H. E., Legvold S., Spedding F. H.**//Phys. Rev. 1963. Vol. 132. № 3. P. 1092—1097.

93. **Ogawa S., Sakamoto N.**//J. Phys. Soc. Jap. 1967. Vol. 22. № 5. P. 1214—1221.

94. **Pauthenet R.**//High Field Magnetism/Ed. by M. Date. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1983. P. 77—86.

95. **Rhyne J. J.** Ph. D. thesis. Iowa State Univ. Ames, Iowa. 1965 (см. в [80]).

96. **Rhyne J. J., Legvold S.**//Phys. Rev. 1965. Vol. 138A, № 1. P. 507—514.

97. **Rhyne J. J., Foner S., McNiff E. J., Jr., Doclo R.**// J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39, № 2. pt 2. P. 892—893.

98. **Richards D. B., Legvold S.**//Phys. Rev. 1969. Vol. 186, № 2. P. 508—514.

99. **Sagawa M., Fujimura S., Togawa N. e. a.**//J. Appl. Phys. 1984. Vol. 55, № 6, pt 2A. P. 2083—2087.

100. **Sato H., Chandrasekhar B. S.**//J. Phys. Chem. Solids. 1957. Vol. 1, № 4. P. 228—233.

101. **Shimizu M.**//Rep. Prog. Phys. 1981. Vol. 44. P. 329—409.

102. **Stoelinga J. H. M., Gersdorf R., de Vries G.**// Physica. 1965. Vol. 31, № 3. P. 349—361.

103. **Strandburg D. L., Legvold S., Spedding F. H.**// Phys. Rev. 1962. Vol. 127, № 6. P. 2046—2051.

104. **Sucksmith W., Thompson J. E.**//Proc. Roy. Soc. 1954. Vol. A225, № 1162. P. 362—375.

105. **Tange H., Tokunaga T.**//J. Phys. Soc. Jap. 1969. Vol. 27, № 3. P. 554—560.

106. **Tebble R. S., Craik D. J.** Magnetic Materials. Lond.: Wiley Intersci., 1969.

107. **Trzebiatowski W.**//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 415—450.

108. **Weiss P., Forrer R.**//Ann. Phys. 1929. Vol. 12. P. 279—281.

109. **Williams G. M., Pavlovic A. S.**//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39, № 2, pt. 1. P. 571—572.

110. **Wohlfarth E. P.**//Ferromagnetic. Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 1—70.

111. **Yamamoto M., Nakamichi T.**//J. Phys. Soc. Jap. 1958. Vol. 13, № 2. P. 228—229.

Глава 28
АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

В. И. Ожогин, В. Г. Шапиро

28.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Обменное взаимодействие, обусловливающее упорядоченную магнитную структуру вещества, может приводить как к параллельной, так и к антипараллельной (а то и к более сложной) взаимной ориентации магнитных моментов соседних атомов в кристаллах. Вещества, в которых происходит полная (или почти полная) компенсация моментов отдельных ионов, называются *антиферромагнетиками*. Сведения о магнитной структуре и свойствах антиферромагнетиков можно найти в монографиях [1—16] и справочнике [17]. Экспериментальные данные по магнитным свойствам антиферромагнетиков, как правило, хорошо объясняются, если представить их магнитную структуру как суперпозицию двух (или более) вставленных одна в другую подрешеток, в каждой из которых магнитные моменты атомов параллельны друг другу. В настоящее время известно большое число различных неколлинеарных магнитных структур, в частности геликоидальные (например, MnO_2, $MnAu_2$), синусоидально-модулированные (типа $CeAl_2$) и другие, у которых компенсация магнитного момента может иметь место по довольно обширному, почти макроскопическому объему кристалла. Эти соединения обычно также относят к антиферромагнетикам. Более подробно о различных неколлинеарных магнитных структурах написано в монографии [12] и обзоре [18].

28.2. ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГКООСНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ MnF_2)

Простейшим двухподрешеточным антиферромагнетиком, свойства которого в настоящее время изучены наиболее детально, является MnF_2 (рис. 28.1). Магнитная восприимчивость выше температуры магнитного упорядочивания — точки Нееля (T_N) подчиняется закону Кюри — Вейса: $\chi = C/(T-\theta)$ (θ в антиферромагнетиках обычно отрицательна), ниже точки Нееля поведение магнитной восприимчивости зависит от направления внешнего магнитного поля относительно осей кристалла. Одноосные кристаллы, т. е. кристаллы, имеющие одно выделенное направление (ось), обычно характеризуются магнитной восприимчивостью χ_{II} в поле, параллельном оси, и $\chi_{\perp}$ в поле, перпендикулярном оси. Если эта ось «легкая», т. е. именно вдоль нее в положении равновесия ориентированы магнитные моменты подрешеток (как в MnF_2), то при $T=T_N$ магнитная восприимчивость $\chi_{\parallel}$ имеет максимум (рис. 28.2). Около точки Нееля имеется также четкий максимум на кривой зависимости удельной теплоемкости от температуры (рис. 28.3). Безусловным критерием существования антиферромагнитного упорядочения могут служить лишь результаты экспериментов по дифракции нейтронов, однако наличие аномалий в температурных зависимостях магнитной восприимчивости и теплоемкости позволяет предполагать (с дос-

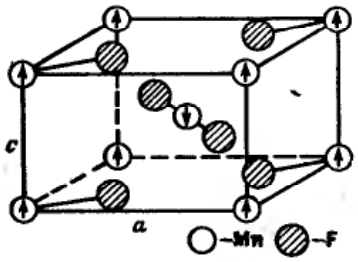


Рис. 28.1. Магнитная структура MnF_2 при $T<T_N$ [16]

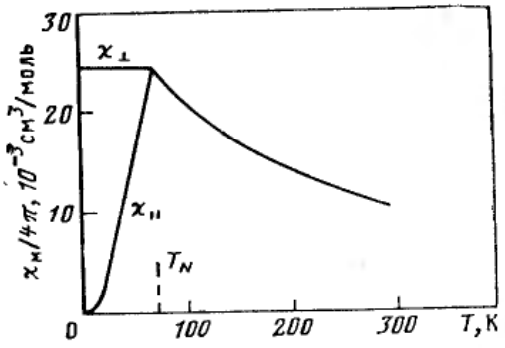


Рис. 28.2. Зависимость восприимчивостей $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ монокристалла MnF_2 от температуры [19]

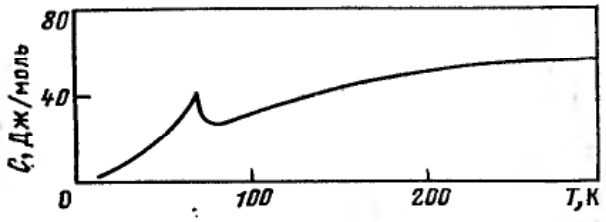


Рис. 28.3. Зависимость удельной теплоемкости MnF_2 от температуры [20]

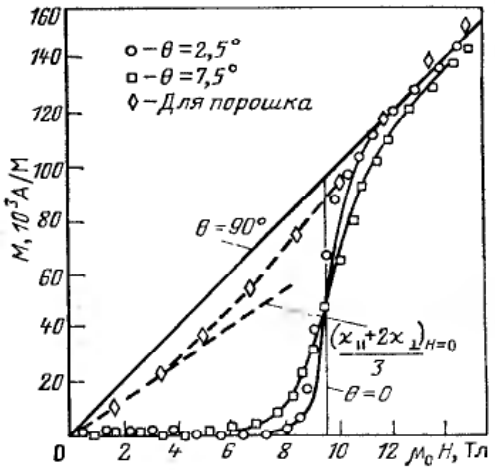


Рис. 28.4. Зависимость намагниченности M монокристалла MnF_2 при $T=4{,}2$ К от напряженности магнитного поля, ориентированного вдоль легкой оси ($\theta=0$) и отклоненного от нее на небольшие углы:

сплошные линии — расчет в приближении теории молекулярного поля [21]

таточно большой вероятностью) существование в кристалле антиферромагнитиого упорядочения

На кривой намагиичивания в поле, параллельиом легкой оси (рис. 28.4), при $\mu_0 H_c = 9{,}3$ Тл наблюдается резкий скачок, соответствующий фазовому переходу

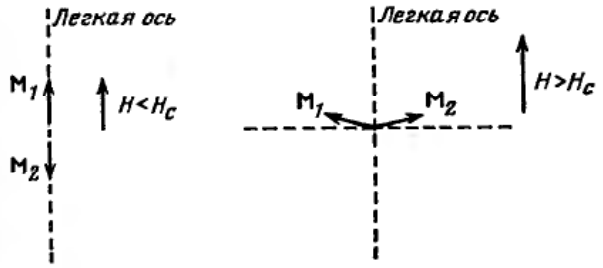


Рис. 28.5. Опрокидывание подрешеток в одиоосиом антиферромагнетике в магнитиом поле, параллельном легкой оси

Рис. 28.6. Магнитная фазовая диаграмма MnF_2 в магнитном поле, параллельном легкой оси [001] [22]:

экспериментальные точки получены с помощью измерения поглощения ультразвука (для нескольких образцов)

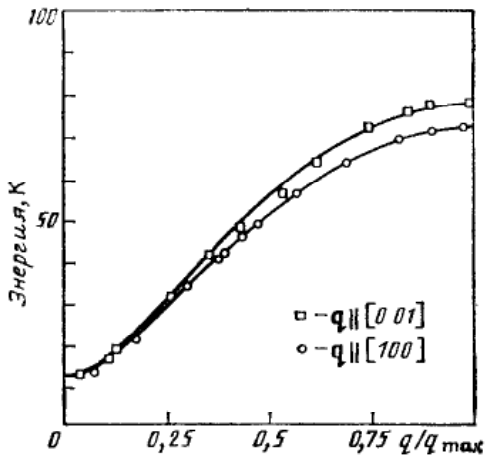


Рис. 28.7. Спектр магионов в MnF_2 при $T = 4{,}2$ К [23]: дисперсиоиные кривые определеиы из неупругого рассеяния нейтронов для двух иаправлений волнового вектора **q**

первого рода между двумя состояниями магнитиой структуры. В этом поле происходит опрокидывание магнитиых подрешеток — спии-флоп (spin-flop) (рис. 28.5). Фазовая диаграмма простого легкоосного антиферромагнетика в TH-плоскости (рис. 28.6) состоит из трех фаз: парамагнитной, антиферромагиитиой и фазы с опрокинутыми подрешетками (спии-флоп-фазы).

Спектр магнонов (спиновых волн) имеет щель (рис. 28.7), которая определяет частоту ω_0 антиферромагнитного резонаиса (АФМР). В приближении теории молекулярного поля $\omega_0 = \gamma \sqrt{H_A \cdot 2H_E - H}$. где H_E и H_A — эффективные поля обмеиа и анизотропии, H — напряжеииость виешнего магнитиого поля, параллельиого легкой оси. Температурная зависимость частоты АФМР обусловлеиа температурной зависимостью полей H_A и H_E (рис. 28.8).

В оптических и иифракрасных спектрах антиферромагиетиков имеются особеииости, обусловлеиные магнитным упорядочением и участием магноиов в поглощении (или рассеянии) электромагиитиых волн. (Вопросы спектроскопии антиферромагнетиков освещены в [4, 7, 25].) Электродипольиое поглощеиие в длиниоволиовой иифракрасиой области, связаиное с одновремеииым рождением двух магноиов (двухмагнонное поглощеиие), иллюстрирует рис. 28.9. Особеиностью оптических спектров поглощеиия антиферромагиитных диэлектриков является наличие дополнительных полос поглощеиия,

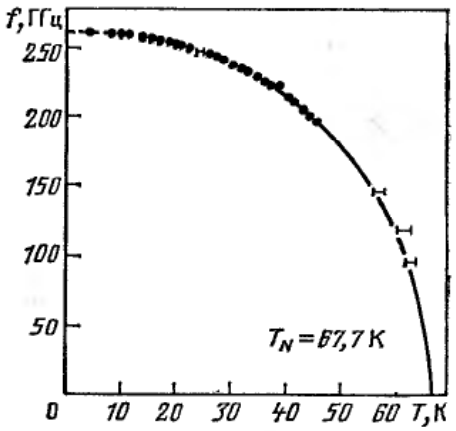


Рис. 28.8. Зависимость частоты АМФР в MnF_2 от температуры [24]:

результаты получены иа высоких частотах в малых магнитных полях. Горизонтальные черточки указывают погрешность при **H=0. Слошная кривая — нормированиая фуикция Брюллюэна для** $S = 5/2$

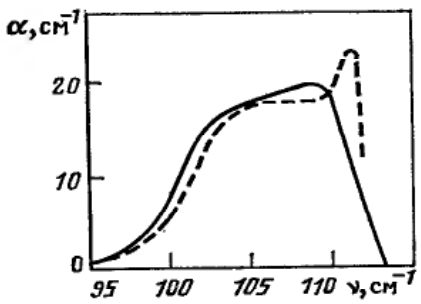


Рис. 28.9. Зависимость коэффициеита поглощения α от частоты, характеризующая форму двухмагнониого поглощения, в MnF_2 при $T = 4{,}2$ К [26]:

электрический вектор электромагиитной волны параллелен легкой оси. Сплошная кривая — эксперимент, пунктирная—расчет

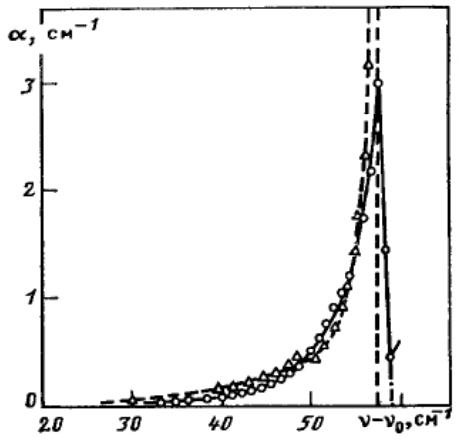


Рис. 28.10. Частотная зависимость коэффициента поглощения света в MnF_2 в области экситон-магнонной полосы поглощения при $T=2{,}2$ К [27]:

$\nu_0=18419{,}6$ см$^{-1}$ — частота магнитодипольной линии, соответствующей экситонному возбуждению; максимум спин-волнового спутника электродипольного происхождения приходится на $\nu=18477$ см$^{-1}$. Сплошная кривая — расчет, пунктирная — эксперимент

обусловленных экситон-магнонным переходом (рис. 28.10). Такие полосы в оптических спектрах антиферромагнетиков называют магнонными спутниками; они отделены от чисто электронных переходов интервалом $\Delta\omega\approx kT_N$. Результаты изучения эффекта Фарадея в красной и фиолетовой областях спектра приведены в обзоре [28], посвященном оптическим и магнитооптическим исследованиям магнитоупорядоченных диэлектриков. Спектры люминесценции антиферромагнитных кристаллов, в том числе MnF_2, обладают рядом низкотемпературных особенностей, происхождение которых не имеет однозначного толкования [7].

28.3. ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГКОПЛОСКОСТНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ $MnCO_3$, $CoCO_3$)

Большой интерес с точки зрения как физических свойств, так и возможного технического применения представляют одноосные антиферромагнетики с анизотропией типа «легкая плоскость» (АФЛП). Выделенное направление в этих кристаллах является «трудной» осью для магнитных моментов подрешеток. Магнитная анизотропия в перпендикулярной этому направлению плоскости (ее называют базисной) обычно много меньше осевой анизотропии, и ею часто пренебрегают. Кривые намагничивания и спектр АФМР в кристаллах, обладающих анизотропией такого типа, существенно отличаются от соответствующих характеристик легкоосных антиферромагнетиков (рис. 28.11 и 28.12).

Ветви АФМР в АФЛП различаются симметрией участвующих в колебаниях компонент намагниченностей подрешеток [30]. Так называемая квазиферромагнитная ветвь (рис. 28.12) имеет щель $\omega_{АФМР}$ $(H=0)$, определяемую средним геометрическим большого обменного поля и малого поля эффективной анизотропии в базисной плоскости. В эту щель могут давать заметный вклад магнитоупругое [32] и (при низких температурах) сверхтонкое [33] взаимодействия. Обменное поле усиливает влияние и магнитоупругого взаимодействия на спектр фононов, приводя к сильной зависимости скорости звука в АФЛП от магнитного поля (точнее, от его компоненты, параллельной легкой плоскости) [34].

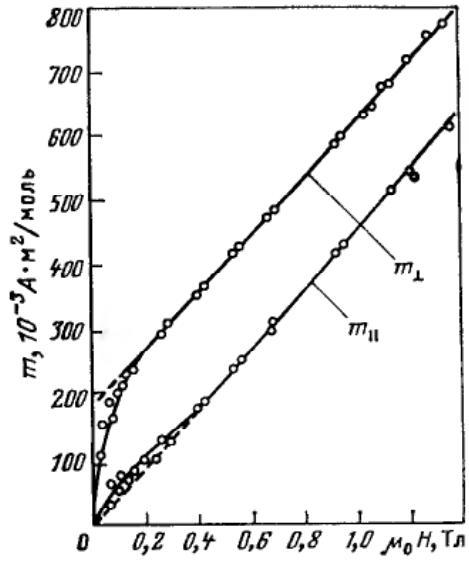


Рис. 28.11. Зависимость молярного магнитного момента от магнитного поля в $MnCO_3$ при $T=4{,}2$ К [29]:

$m_{\parallel}$ — поле направлено вдоль трудной оси; $m_{\perp}$ — поле приложено в базисной плоскости. Спонтанный момент обусловлен взаимодействием Дзялошинского, а не типом анизотропии

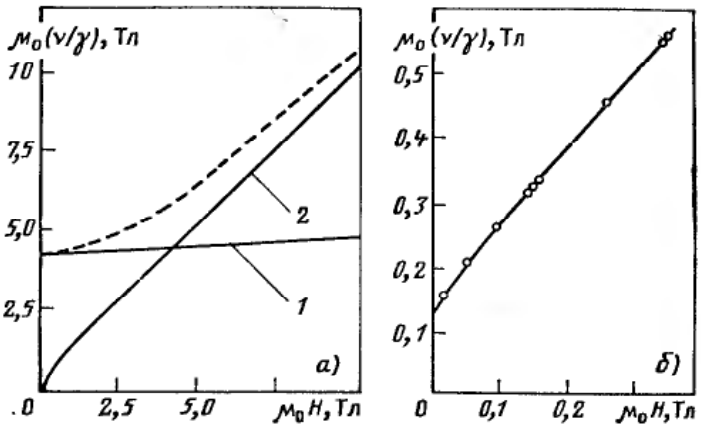


Рис. 28.12. Спектр АФМР в $MnCO_3$ при $T=4{,}2$ К [31]:

а — сплошные кривые — поле приложено в базисной плоскости, пунктир — перпендикулярно; *1* — квазиантиферромагнитная ветвь колебаний; *2* — квазиферромагнитная ветвь (возбуждается переменным магнитным полем, перпендикулярным постоянному); *б* — экспериментальные результаты [33] для малых значений напряженности поля

Дисперсия спиновых волн в АФЛП обладает определенной анизотропией. Например, в $CoCO_3$ бо́льшую энергию при заданном $|\mathbf{k}|$ имеют спиновые волны, которые распространяются в направлении, перпендикулярном магнитному полю и легкой оси. Данные, приведенные на рис. 28.13 для $CoCO_3$, получены методом одномагнонного мандельштам-бриллюэновского рассеяния света с использованием в качестве анализатора интерферометра Фабри — Перо.

Особенности спектра и взаимодействий магнонов в АФЛП облегчают реализацию параметрического возбуждения спиновых волн в этих кристаллах [36]. В $MnCO_3$ при параллельной ориентации высокочастотного и статического магнитных полей параметрическое возбуждение магнонов квазиферромагнитной ветви происходит с участием вынужденных колебаний квазианти-

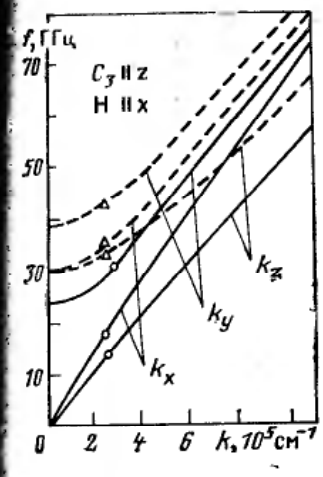


Рис. 28.13. Зависимость частоты магионов от волнового вектора при $H=0$ (сплошные кривые) и $\mu_0 H=0{,}1$ Тл (пунктир) для $CoCO_3$ [35, с. 245]

ферромагнитной ветви и может иметь скачкообразный («жесткий») характер [37].

При измерении теплопроводности $\varkappa$ в $MnCO_3$ и $CoCO_3$ были обнаружены особенности на кривых зависимости $\varkappa(T)$ в точке Нееля (рис. 28.14) [38]. Кроме $MnCO_3$ и $CoCO_3$ достаточно подробно изучены свойства и других АФЛП: $NiCO_3$, FeF_3, $FeBO_3$, α-Fe_2O_3 ($T_M<T<T_N$)*1, $CsMnF_3$ и др. (см. табл. 28.1).

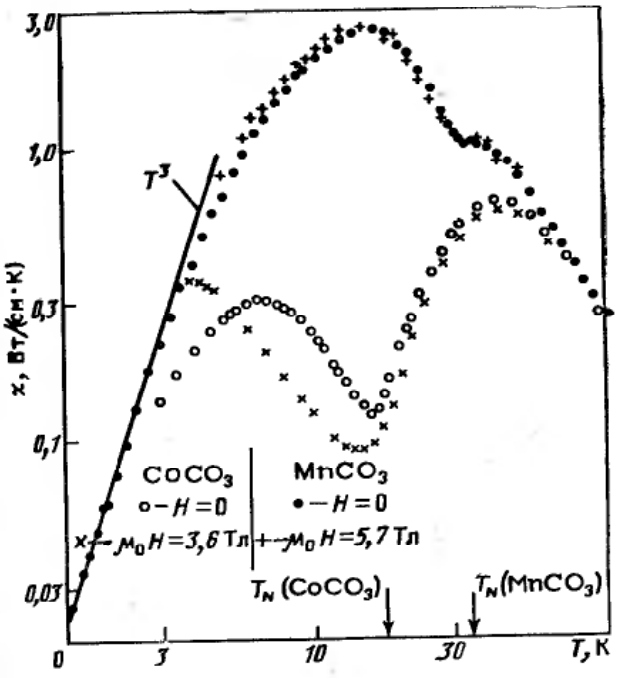


Рис. 28.14. Зависимость теплопроводности от температуры для $CoCO_3$ и $MnCO_3$

28.4. МЕТАМАГНЕТИКИ

Метамагнетиками называют вещества, которые в отсутствие поля не имеют спонтанного момента, но приобретают его, начиная с некоторого критического поля. К ним относятся антиферромагнетики, у которых эффективное поле легкоосной анизотропии больше эффективного поля обменного взаимодействия: $2H_A>H_E$.

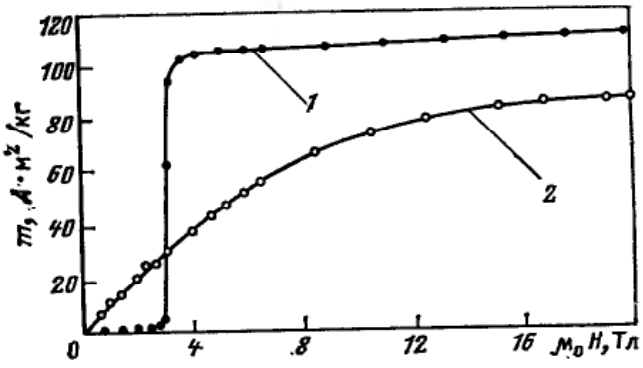


Рис. 28.15. Кривые намагничивания $FeBr_2$ [39]:
1 — метамагнитное состояние, $T=4{,}2$ К; *2* — парамагнитное состояние, $T=20{,}4$К

Типичные зависимости $M(H)$ метамагнетиков приведены на рис. 28.15. При $T<T_N$ и поле $H=H_0$ (T) вещество переходит из антиферромагнитной фазы в ферромагнитную, минуя спин-флоп-фазу. Ниже приведены температуры упорядочивания и значения полей перехода (при $T \ll T_N$) некоторых типичных метамагнетиков [15]:

Метамагнетик	T_N, К	$\mu_0 H_0$, Тл
$FeCl_2$	23,5	1,05
$FeBr_2$*1	11	3,1
$FeCO_3$	38	15,3 [40]

Более подробные сведения о свойствах метамагнетиков можно найти в монографиях [1, 15].

28.5. АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ СО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДЗЯЛОШИНСКОГО

Существует ряд антиферромагнитных кристаллов, при описании магнитных свойств которых кроме изотропного обменного взаимодействия, определяющего собственно магнитное упорядочение, необходимо учитывать специфическое анизотропное взаимодействие Дзялошинского (ВД)*2. ВД, как правило, приводит к небольшому наклону магнитных подрешеток друг относительно друга и появлению слабого ферромагнитного момента.

В [10] рассмотрены условия, при которых магнитная симметрия кристалла допускает существование слабого ферромагнетизма. В тех случаях, когда тип анизотропии или другие обстоятельства (например, $T>T_N$) не допускают возникновения слабоферромагнитного момента, наложение внешнего магнитного поля может приводить к возникновению определенных компонент антиферромагнитного вектора — так называемый индуцированный полем антиферромагнетизм [42].

Антиферромагнетики, обладающие слабым спонтанным моментом [$MnCO_3$, $CoCO_3$, α-Fe_2O_3 ($T>T_M$), CuF_2, NiF_2, $RFeO_3$ (R — редкоземельный ион), $NaNiF_3$, $YCrO_3$

---

* T_M — точка Морина — температура, при охлаждении ниже которой α-Fe_2O_3 переходит из легкоплоскостного состояния в легкоосное.

*1 $FeBr_2$ обладает антиферромагнитной слоистой структурой, характерной для многих метамагнетиков (два соседних слоя металлических ионов имеют антипараллельное направление магнитных моментов).

*2 Этот термин появился в литературе по магнетизму после феноменологического объяснения Дзялошинским [41] природы слабого ферромагнетизма в некоторых антиферромагнитных кристаллах. Влияние ВД на основные свойства антиферромагнетнков исследовано в [10].

и др.], часто называют слабыми ферромагнетиками*1. В случае, когда подрешеток больше двух, их скос может не приводить к появлению спонтанного момента*2. В некоторых четырехподрешеточных антиферромагнетиках (например, Cr_2O_3 [41], $CoSO_4$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ [15]) две подрешетки дают слабый суммарный момент $+\mathbf{m}$, а две другие — $\mathbf{m}$, так что полный момент образца равен нулю. Существует много кристаллов (наиболее характерные примеры CoF_2 [43], α-Fe_2O_3 при $T<T_M$), в которых при $H=0$ ВД не приводит к скосу магнитных моментов подрешеток, однако его необходимо учитывать для адекватного описания магнитных свойств таких кристаллов в сильных магнитных полях [44, 45].

28.6. ПЬЕЗОМАГНЕТИКИ И МАГНИТОЭЛЕКТРИКИ

Пьезомагнетики — это вещества, у которых при наложении упругих напряжений возникает спонтанный магнитный момент, пропорциональный первой степени напряжения. Пьезомагнитный эффект сравнительно мал и практически может быть обнаружен только в антиферромагнетиках, которые не обладают в нормальных условиях спонтанным моментом. Появление спонтанного момента в таких кристаллах объясняется изменением их магнитной структуры вследствие деформации при наложении упругих напряжений [2]. Пьезомагнитная намагниченность M_i связана с тензором упругих напряжений σ_{jk} соотношением $M_i=\Lambda_{ijk}\sigma_{jk}$. Для MnF_2 и CoF_2 в соответствии с требованиями симметрии отличны от нуля только три компоненты пьезомагнитного тензора: $\Lambda_{xyz}=\Lambda_{yxz}$ и Λ_{zxy}. При $T=20{,}4$ К эти компоненты для CoF_2 имеют значения: $\Lambda_{xyz}=2\cdot10^{-5}$ А·м/Н, $\Lambda_{zxy}=0{,}8\cdot10^{-5}$ А·м/Н [46]. В случае MnF_2 эффект примерно в 100 раз меньше. Пьезомагнитный эффект обнаружен также в $FeCO_3$, α-Fe_2O_3 и др. [47].

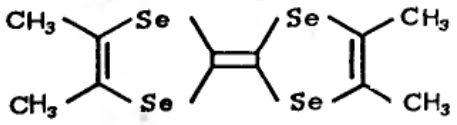
Магнитоэлектрики — вещества, у которых при помещении их в электрическое поле возникает магнитный момент, пропорциональный напряженности поля. Впервые магнитоэлектрический эффект был обнаружен в антиферромагнитном кристалле Cr_2O_3. Величина эффекта характеризуется тензорным коэффициентом пропорциональности α_{ik} между возникающей намагниченностью и приложенным электрическим полем. Для Cr_2O_3 α_{zz} (250 К) $=1{,}9\cdot10^{-5}$ А/В [48]. Магнитоэлектрический эффект обнаружен также в антиферромагнетиках Fe_2TeO_6, $Nb_2Co_4O_9$, Nb_2MnO_9, $Ta_2Mn_4O_9$ [49] и др.*3

28.7. АКУСТОМАГНЕТИКИ

В антиферромагнетиках с высокой температурой Нееля квазизвуковые моды, возникающие благодаря связи между упругой (практически линейной) и магнитной (нелинейной) подсистемами, обладают сильной нелинейностью. Эта нелинейность особенно велика, если одна из магнитных мод без учета магнитострикции оказывается «мягкой» ($\tilde{\omega}_{\text{рез}}\to0$), что возможно либо в силу «легкоплоскостного» характера анизотропии (как в гематите α-Fe_2O_3 при $T_M<T<T_N$), либо при приближении к точке той или иной спиновой переориентации (как, например, в редкоземельных ортоферритах ($RFeO_3$). Большая нелинейность приводит к тому, что в антиферромагнетиках указанного класса реализуются звуковые аналоги явлений нелинейной оптики, такие как удвоение частоты звука и акустическое детектирование, самовоздействие звуковой волны, вынужденное комбинационное рассеяние звуковых волн, их самофокусировка и др. [51]. Очень большая магнитоупругая динамическая связь в этих твердых телах позволяет выделить их в технически важный класс кристаллов — *акустомагнетики.*

28.8. ОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ

Органические сверхпроводники типа $(TMTSF)_2X$, основанные на молекуле тетраметилтетраселенфулвалена



и имеющие в качестве X^- один из симметричных октаэдрических анионов PF_6^-, AsF_6^-, SbF_6^- и TaF_6^-, обнаруживают сверхпроводимость при небольших давлениях $p=(0\text{—}18)\cdot10^8$ Па и $T\approx1$ К. Некоторые из этих соединений ниже точки перехода металл — диэлектрик обладают антиферромагнитным упорядочением, характеризуемым волной спиновой плотности. Антиферромагнитное упорядочение зафиксировано в $(TMTSF)_2AsF_6$ и $(TMTSF)_2PF_6$ при $T<T_c\approx12$ К*1 [53, 54]. Из измерений магнитной восприимчивости на монокристаллических образцах [53] следует, что в $(TMTSF)_2AsF_6$ реализуется простая антиферромагнитная структура с легкой, промежуточной и трудной осями, направленными соответственно вдоль a, b' и c' [триклинную структуру $(TMTSF)_2X$ обычно аппроксимируют орторомбической с осями a, b', c', определяемыми главными осями тензора электрического сопротивления]. В $(TMTSF)_2ClO_4$ сверхпроводящее состояние возникает при атмосферном давлении и $T\approx1{,}3$ К, а антиферромагнетизм наблюдается при $T<6$ К [55] после быстрого охлаждения.

28.9. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Помещаемый здесь справочный материал относится в основном к магнитным свойствам диэлектриков, обладающих антиферромагнитным упорядочением. Кроме того, приведены свойства некоторых антиферромагнитных полупроводников, металлов и металлических сплавов*2.

Таблица 28.1 не охватывает всех известных к моменту издания справочника антиферромагнетиков. Составители стремились дать общее представление о свойствах различных типов антиферромагнитных кристаллов, начиная от наиболее известных и хорошо изученных антиферромагнитных диэлектриков и кончая недавно открытыми сверхпроводящими соединениями. Важным, хотя и не необходимым, критерием отбора материала служил факт установления в соединении антиферромагнитной структуры методом нейтронной дифракции. Не было возможности с максимальной полнотой привести данные о некоторых группах соединений. Так, практически не представлена (кроме двух веществ) обширная группа

*1 В зарубежной литературе их называют скошенными (canted) антиферромагнетиками, а термин «слабый ферромагнетизм» относят к ферромагнетизму нелокализованных электронов, имеющему место в $ZrZn_2$ и т. п.).

*2 В зарубежной литературе — «скрытое скашивание» (hidden canting).

*3 Подробная классификация материалов по их магнитным, электрическим и упругим свойствам, выполненная на основе кристалломагнитной симметрии, дана в обзоре [50].

*1 Подробнее о природе перехода металл—диэлектрик, который не является переходом пайерлсовского типа, а также о связи сверхпроводимости с состоянием, описываемым волной спиновой плотности, см. в [52].

*2 В [56] представлены основные классы антиферромагнитных диэлектриков.

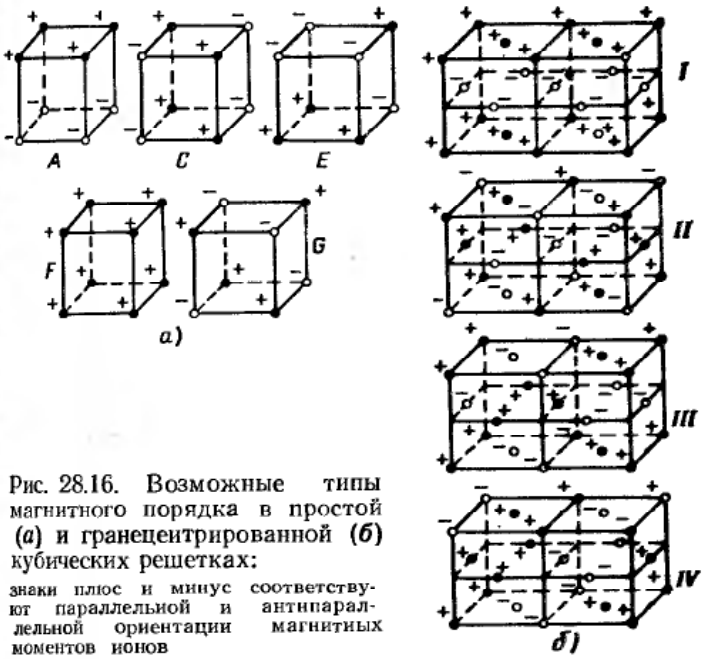


Рис. 28.16. Возможные типы магнитного порядка в простой (*а*) и гранецентрированной (*б*) кубических решетках:

знаки плюс и минус соответствуют параллельной и антипараллельной ориентации магнитных моментов ионов

антиферромагнетиков со структурой граната[1]. Отсутствуют также сведения о многих редкоземельных сплавах и соединениях[*2].

Информация о магнитной структуре многих антиферромагнетиков, исследованных методом нейтронной дифракции, содержится в [3]. Типы магнитного упорядочения в кубических решетках приведены на рис. 28.16.

Последовательность расположения веществ в табл. 28.1 соответствует порядковому номеру магнитного атома в таблице Менделеева. Соединения с одним и тем же магнитным атомом расположены в порядке возрастающей сложности (например, соединения, состоящие из трех элементов вида $R_lA_kB_l$ с магнитным атомом R, расположены в порядке возрастания числа $n=100l+10k+l$). При одинаковых числах n соединения расположены в порядке расположения атомов A и B в Периодической системе элементов Д. И. Менделеева.

Условные обозначения и принятые в табл. 28.1 сокращения

I, II, III, IV — возможные типы магнитного порядка в гранецентрированной кубической решетке (рис. 28.16, *б*);

A, C, E, F, G — возможные типы магнитного порядка в простой кубической решетке (рис. 28.16, *а*);

[*a*], [*b*], [*c*] — кристаллографические оси в триклинной, моноклинной, орторомбической и гексагональной сингониях;

(*ab*), (*bc*), (*ac*) — кристаллографические плоскости в триклинной, моноклинной и орторомбической сингониях;

a*, **b***, **c*** — векторы обратной решетки;

C — ось наивысшей симметрии в тетрагональной, тригональной, гексагональной сингониях;

D — спиновая размерность, определяемая числом ортогональных компонент спина;

d — размерность магнитной решетки, определяемая пространственной анизотропией обменного взаимодействия[*1];

E_g — ширина энергетической щели в спектре электронных возбуждений для веществ, обладающих свойствами полупроводников;

F, G, C, A — векторы, образованные линейной комбинацией магнитных моментов в четырехподрешеточной модели антиферромагнетика[*2]:

$$\mathbf{F} = (1/4)(\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 + \mathbf{M}_3 + \mathbf{M}_4);$$

$$\mathbf{G} = (1/4)(\mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2 + \mathbf{M}_3 - \mathbf{M}_4);$$

$$\mathbf{C} = (1/4)(\mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 - \mathbf{M}_3 - \mathbf{M}_4);$$

$$\mathbf{A} = (1/4)(\mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2 - \mathbf{M}_3 + \mathbf{M}_4);$$

H_A — напряженность эффективного поля магнитной анизотропии[*3];

H_c — напряженность внешнего магнитного поля, при которой наблюдается та или иная особенность в зависимости намагниченности вещества от магнитного поля;

$H_{c2}(0)$ — верхнее («второе») критическое значение напряженности поля при $T=0$ К для сверхпроводника второго рода;

H_D — напряженность эффективного поля, связанного с взаимодействием Дзялошинского (см. § 28.5);

H_E — напряженность эффективного обменного поля;

$H_{рез}$ — напряженность магнитного поля, при которой наблюдается антиферромагнитный резонанс;

$\Delta H_{рез}$ — ширина линии антиферромагнитного резонанса по магнитному полю;

J — константа, характеризующая обменное взаимодействие между соседними магнитными ионами в изотропных системах или же между соседними магнитными ионами внутри линейных цепей в квазиодномерных ($d=1$) системах либо внутри плоскостей в квазидвумерных ($d=2$) системах;

J' — константа, характеризующая об-

[*1] Сведения о них можно найти в [57].

[*2] Данные по антиферромагнетизму этих соединений см. в [58].

[*1] При модельном описании поведения антиферромагнетиков обычно рассматривают обменный гамильтониан $H=\sum_{ij} J^{II}_{ij} S^z_i S^z_j + J^{\perp}_{ij}(S^x_i S^x_j + S^y_i S^y_j)$, при этом модели Гейзенберга ($D=3$) соответствует случай $J^{II}_{ij} = J^{\perp}_{ij}$, модели Изинга ($D=1$) $J^{\perp}_{ij}=0$, XY-модели ($D=2$) $J^{II}_{ij}=0$. Если $J^{II} \neq J^{\perp}$, то говорят о спиновой анизотропии обменного взаимодействия. если $J(R_{ij})$ по-разному зависят от R вдоль различных главных направлений кристалла, то говорят о пространственной анизотропии объемного взаимодействия.

[*2] Устойчивую спиновую конфигурацию (магнитный порядок) в антиферромагнитных кристаллах часто описывают с помощью инвариантов второго порядка, образованных из компонент векторов **F, G, C, A** и преобразующихся по одному неприводимому представлению пространственной группы кристаллов [11].

[*3] В таблице даны числовые значения магнитной индукции, соответствующие значениям напряженности магнитного поля в СИ (для вакуума справедливо соотношение 1 Тл$=\mu_0 \cdot$1А/м, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Если не указана конкретная температура, то значение относится к $T \ll T_N$.

менное взаимодействие между магнитными ионами, принадлежащими соседним линейным цепям в квазиодиомерных ($d=1$) системах либо соседним плоскостям в квазидвумерных ($d=2$) системах;

la, mb, nc — магнигиая ячейка (в m, l, n раз увеличивается размер магнитиой ячейки по сравиению с кристаллографической ячейкой соответственно вдоль кристаллографических осей a, b и c);

n_s — число магнетонов Бора иа атом в состояиии насыщения;

p — эффективное число магнетонов Бора на атом в выражении, определяющем $C_м$ ($C_м=Np^2\mu_B^2/3k$);

T_N, T_N(A) — температура антифферомагнитного упорядочиваиия, температура упорядочиваиия ионов A[*1];

$T_п$ — температура переориентации магнитных моментов относительно кристаллографических осей;

$\alpha(\mu, [ikl])$ — угол между направлением магнитного момеита μ и кристаллографической осью $[ikl]$;

θ, $C_м$ — постоянные в законе Кюри — Вейса, $\chi_м=C_м/(T-\theta)$ (как правило, $\theta<0$);

$\lambda(0)$ — длина волны электромагнитиого излучения, соответствующая частоте антиферромагнитного резоианса в нулевом магнитиом поле (при $T \ll T_N$);

μ — магнитиый момент иона (атома);

$\mu_A(T)$[*2] — магнитиый момент иона (атома) A при температуре T (в магнетонах Бора μ_B);

$A\nu_Z$ — частота ядерного магнитного резонанса, соответствующая внутреннему магнитному полю на ядре ${}^A Z$, где A — массовое число изотопа элемента Z;

ρ — удельное сопротивление;

$\sigma_м(T)$[*3] — молярный спонтанный магиитный момент при температуре T, А·м^2/моль (1 ед. СГСМ=10^{-3} ед. СИ);

$\sigma_{уд}(T)$ — удельный спонтанный магнитный момент при температуре T, А·м^2/кг (1 ед. СГСМ=1 ед. СИ);

$\chi_м$ — молярная магнитная восприимчивость, см^3/моль (1 ед. СГСМ=4π ед. СИ);

$\chi_{уд}$ — удельиая магиитная восприимчивость, см^3/г (1 ед. СГСМ=4π ед. СИ);

* * *

АФ — антиферромагиитное состояние;
АФВ между (ikl) — аитиферромагиитиое взаимодействие между магнитными атомами, принадлежащими соседним плоскостям (ikl), которое приводит к антипараллельной ориентации магнитных моментов атомов соседних плоскостей (ikl);

АФМР — антиферромагиитный резонаис;
ВСП — волна спиновой плотности;
ГС — геликоидальиая магнитная структура (k_0 — вектор распространения геликоида);

КС — коллииеарная магнитная структура;
ЛО — легкая ось;
ЛП — легкая плоскость;
МП — магнитный порядок;
НКС — неколлииеариая магнитная структура;
П — парамагнитиое состояние;
СВ — синусоидально модулированиая магнитиая структура (спиновая волна);
СФ — слабое ферромагнитное состояние;
Ф — ферромагнитное состояние;
ФВ (АФВ) в (ikl) — ферромагнитное (антиферромагнитиое) обменное взаимодействие между магнитными атомами, принадлежащими одной плоскости (ikl), которое приводит к параллельной (антипараллельной ориентации магнитных моментов атомов плоскости (ikl);
ЯМР — ядерный магиитный резонанс.

* * *

Индексы в обозначениях отдельных физических величин[*1]:

$\parallel (\perp)$ — даиная величина относится к направлению, параллельному (перпендикулярному) выделенной в кристалле оси;

$[ikl]$, $[a]$, $[b]$, $[c]$ — даиное значение относится к соответствующему кристаллографическому направлению.

[*1] Значения температуры Нееля T_N, приведенные в табл. 28.1, получены в основном из данных измерений магнитиой восприимчивости или нейтронного рассеяния. Значения T_N, полученные из данных измерений теплоемкости (это отмечено в сносках), как правило, несколько от них отличаются.

[*2] μ_A (0 К) — зиачение при $T \longrightarrow 0$ К.

[*3] δ (0 К) — значение при $T \longrightarrow 0$ К.

[*1] Те же иидексы, стоящие при числовых значениях, озиачают, что измерение проводилось в соответствующем направлении.

Таблица 28.1. Некоторые свойства антиферромагнетиков

Вещество	Структура		T_N, K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
α-O_2	Моноклинная C_{2h}^3	КС, $\mu \parallel [010]$	23,9	$\mu_{O_2}(4{,}2\ \text{K}) = 2\mu_B$	[3]
α-KO_2[*1]	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel (001)$ ФВ в (001) АФВ между (001)	7	$\theta = -3$ K, $p = 1{,}03$ } $T < 150$ K $\theta = -53$ K, $p = 1{,}2$ } $T > 150$ K	[3, 17]
$LaTiO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	G-тип МП (Ti)	125	$\mu_{Ti^{3+}}(10\ \text{K}) = 0{,}45\mu_B$ Металлическая проводимость при $T > 125$ K	[59]
α-VS	Гексагональная D_{6h}^4	—	1040 900[*2]	$\theta = -3000$ K $\chi_M(T_N)/4\pi =$ $= 6{,}6 \cdot 10^{-5}$ см³/моль	[17]
α-VSe	Гексагональная D_{6h}^4	—	163	$\theta = -2570$ K	[17]
VF_2	Тетрагоиальная D_{4h}^{14}	ГС, $\mathbf{k}_0 \parallel C$ $\mu \perp C$	7	$\theta = -80$ K	[3, 17]
VCl_3	Тригональная D_{3d}^6	—	30	—	[17]
V_2O_3	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel [111]$	150	$\rho(T_N+0)/\rho(T_N-0) \approx 10^9$ [*3] $\mu_{V^{3+}} < 0{,}05\mu_B$	[3, 17]
VOCl	Орторомбическая D_{2h}^{13}	КС, $\mu \parallel [a]$	80,5	$\mu_V(4\ \text{K}) = 1{,}48\mu_B$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$	[60]
$LaVO_3$	Кубическая O_h^5	$\mu \perp C$ ФВ в (010) АФВ в (001)	133—144	$\theta = -665$ K $\mu_V(4{,}2\ \text{K}) = 1{,}31\mu_B$	[3]
V_2WO_6	Тетрагональная D_{4h}^{14}	НКС, $\mu \perp C$	370	—	[3]
MgV_2O_4	Кубическая O_h^7 (тетрагональные искажения при $T < T_N$)	$\mu \parallel C$	45	$\theta = -750$ K, $p = 3{,}43$ $\mu_{V^{3+}}(4{,}2\ \text{K}) = 1{,}0\mu_B$	[3]
CaV_2O_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\mu \parallel [b]$ (a, $2b$, $2c$)		$\mu_{V^{3+}}(4{,}2\ \text{K}) = 1{,}0\mu_B$	[3]

[*1] Магнитные свойства α-KO_2 обусловлены наличием неспаренного электрона у $2p$-молекулярной орбитали π-типа иона O_2^-.

[*2] Из измерений теплоемкости.

[*3] Одновременно с переходом П — АФ в V_2O_3 происходит переход металл — полупроводник. При $T = T_N$ электропроводность меняется на девять-десять порядков. Описание электронной структуры и обзор магнитных свойств V_2O_3 см. в книге **Бугаев А. А., Захарченя Б. М., Чудновский Ф. А.** Фазовый переход металл — полупроводник и его применение. Л.: Наука, 1979.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
ZnV_2O_4	Кубическая O_h^7 (тетрагональные искажения при $T < T_N$)	КС. $\mu \parallel C$	45	$\theta = -256$ К, $p = 2{,}18$ $\mu_{V^{3+}}(4{,}2\text{ К}) = 0{,}8\,\mu_B$	[3]
α-Cr	Кубическая O_h^9	$\mu \parallel [100]$ $T_{SF} \approx 122$ К*1	312	$\mu\,(77\text{ К}) = 0{,}59\mu_B$	[1, 3, 61]
CrN	Кубическая O_h^5 (орторомбические искажения при $T < T_N$)	IV тип МП, $\mu \parallel [110]$ $(2a, 2a, 2a)$	273	$\mu_{Cr}\,(77\text{ К}) = 2{,}4\,\mu_B$	[3]
CrS	Моноклинная C_{2h}^6	ФВ в (011) АФВ между (011)	460	$\theta = -695$ К, $p = 4{,}22$ $\mu_{Cr}\,(77\text{ К}) = 3{,}4\,\mu_B$	[3, 17]
CrAs	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС, $\mathbf{k}_0 \parallel [c]$	260—280	$\mu_{Cr}\,(77\text{ К}) = 2{,}0\,\mu_B$ $\mu_{Cr}\,(4{,}2\text{ К}) = 1{,}7\,\mu_B$	[3]
CrSe	Гексагональная D_{6h}^4	НКС $\alpha\,(\mu, C) = 45°$ $(3a, 3a, c)$	200—300	$p = 4{,}6$, $\mu_{Cr}\,(4{,}2\text{ К}) = 2{,}9\mu_B$	[3, 17]
CrSb	Гексагональная D_{6h}^4	КС ФВ в (001) АФВ между (001)	663—723	$p = 3{,}89$, $\chi_м(T_N)/4\pi = 1{,}92\cdot10^{-3}$ см³/моль $\mu_{Cr^{3+}}\,(290\text{ К}) = 2{,}84\mu_B$	[3, 17]
CrRe (сплав с концентрацией Re больше 17%)	ГЦК	—	160	Зонный антиферромагнетик; сверхпроводник при $T \leqslant 3$ К	[62]
CrF_2	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel (010)$ $\alpha\,(\mu, [c]) = 32°$	53	$p = 4{,}3$, $\mu_{Cr^{2+}}\,(4{,}2\text{ К}) = 3{,}96\mu_B$	[3, 17]
$CrCl_2$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	КС*2 ФВ в (011) АФВ между (011) $(a, 2b, 2c)$	20	$\theta = -149$ К $\mu_{Cr}\,(4{,}2\text{ К}) = 3{,}68\mu_B$	[3, 17]
$CrSb_2$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	$\mu \parallel [101]$ ФВ в (011) АФВ между (011) $(a, 2b, 2c)$	273	$\mu_{Cr}\,(4{,}2\text{ К}) = 1{,}49\mu_B$	[3]
CrF_3	Тригональная D_{3d}^6	КС, $\mu \parallel (111)$	80	$\theta = -124$ К $p = 4{,}1$, $\mu_{Cr}\,(4{,}2\text{ К}) = 3\mu_B$ $\sigma\,(0\text{ К}) = 169\cdot10^{-3}$ А·м²/моль	[3, 17]

*1 Магнитная структура представляет собой стоячую ВСП с волновым вектором **Q** и вектором поляризации η. При $T < T_{SF}$ — продольная ВСП ($\mathbf{Q} \parallel \eta$), при $T > T_{SF}$ — поперечная ВСП ($\mathbf{Q} \perp \eta$).

*2 Магнитные моменты ионов параллельны длинной связи Cr — Cl.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$CrCl_3$	Тригональная D_3^3	КС, $\mu \perp C$ ФВ в (001) АФВ между (001) $(a, a, 2a)$	16,8	$\theta = 29$ К $\chi_м(T_N)/4\pi = 6{,}0$ см³/моль $\mu_{Cr^{3+}}(4{,}2\text{ К}) = 2{,}82\mu_B$ $\mu_0 H_{c\parallel}(1{,}7\text{ К}) = 5$ Тл $\mu_0 H_{c\perp}(1{,}7\text{ К}) = 0{,}26$ Тл	[3, 17]
$CrAu_4$	Тетрагональная D_{4h}^{18}	НКС, $\mu \perp C$	380	—	[3]
β-$AlCr_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\alpha(\mu, C) = 65°$	598	$\mu_{Cr} = 0{,}92\mu_B$	[3]
Cr_2As	Тетрагональная D_{4h}^7	$\mu \parallel (001)$ $(a, a, 2c)$	393—438	$\theta = -2067$ К, $p = 1{,}8$ $\mu_{Cr\ I}(77\text{ К}) = 1{,}1\mu_B$ $\mu_{Cr\ II}(77\text{ К}) = 1{,}2\mu_B$	[3, 17]
Cr_2O_3	Тригональная D_{3d}^6	КС, $\mu \parallel C$	308	$p = 2{,}6$, $\mu_{Cr}(4{,}2\text{ К}) = 2{,}8\mu_B$ $\mu_0 H_{c\parallel}(77\text{ К}) = 5{,}9$ Тл $\lambda(0) = 189$ мкм $^{50}\nu_{Cr}(1{,}6\text{ К}) = 70{,}43$ МГц*1	[3, 17]
β-Cr_2S_3	Тригональная C_{3i}^2	КС, $\mu \perp C$	120—122	$\theta = -636$ К $\mu_{Cr\ I}(4{,}2\text{ К}) = 1{,}72\mu_B$ $\mu_{Cr\ II}(4{,}2\text{ К}) = 1{,}36\mu_B$ $\mu_{Cr\ III}(4{,}2\text{ К}) = 1{,}82\mu_B$	[3]
Cr_2O_5		—	100	$\theta = -140$ К	[17]
Cr_3S_4	Моноклинная C_{2h}^3	$\alpha(\mu, [101]) = 29°$ $(2a, b, 2c)$	280	$\theta = -547$ К	[3, 17]
Cr_3Se_4	Моноклинная C_{2h}^3	$\mu \parallel (10\bar{1})$ $\alpha(\mu, [b]) = 30°$ $(2a, b, 2c)$	80	$\theta = -60$ К $\mu_{Cr\ I}(4{,}2\text{ К}) = 4\mu_B$ $\mu_{Cr\ II}(4{,}2\text{ К}) = 3\mu_B$	[3, 17]
Cr_5S_6	Гексагональная D_{3d}^2	ГС, $\mathbf{k}_0 \parallel C$ при $T < T_N$	150—160	Ферримагнетик при $T_N < T < T_C = 305$ К $\Delta\sigma(T_N) = 1{,}85$ А·м²/кг $\rho = (77\text{ К}) = 5 \cdot 10^4$ Ом·см $\mu_{Cr\ I}(4{,}2\text{ К}) = 2{,}98\mu_B$ $\mu_{Cr\ II}(4{,}2\text{ К}) = 2{,}77\mu_B$ $\mu_{Cr\ III}(4{,}2\text{ К}) = 2{,}78\mu_B$ $\mu_{Cr\ IV}(4{,}2\text{ К}) = 2{,}75\mu_B$	[3, 17]
$LiCrS_2$	Тригональная D_3^2 или D_{3d}^3	НКС	55	$p = 3{,}83$, $\mu_{Cr}(4{,}2\text{ К}) = 2{,}26\mu_B$	[3]
$KCrF_3$	Тетрагональная C_{4h}^{10}	$\mu \perp C$ А-тип МП	40	$\mu_{Cr^{2+}}(4{,}2\text{ К}) = 4{,}27\mu_B$	[3, 17]

*1 См. приложение II в [8].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$YCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\sigma \parallel [c]$ $\mu \parallel [a]$	141	$\mu_0 H_{c,[a]} = 3{,}3$ Тл[*1] $\mu_{Cr^{3+}}$ (4,2 К) $= 2{,}96\,\mu_B$	[3, 17]
$LaCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	G-тип МП	282—320	$\theta = -430$ К, $p = 2{,}76$ $\chi_м (T_N)/4\pi = 1{,}9\times$ $\times 10^{-3}$ см^3/моль $\mu_{Cr^{3+}}$ (4,2 К) $= 2{,}45\,\mu_B$	[3, 17, 63]
$CeCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	257 (Cr)	—	[3]
$PrCrO_3$	Орторомбнческая D_{2h}^{16}	КС, $\mu_{Cr} \parallel [a]$ $\mu_{Pr} \parallel [c]$[*2]	239 (Cr)	$\theta = -133$ К, $p = 2{,}87$ $\mu_{Cr^{3+}}$ (4,2 К) $= 2{,}46\,\mu_B$ $\mu_{Pr^{3+}}$ (4,2 К) $= 0{,}5\,\mu_B$	[3, 17, 63]
$NdCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС (Cr), $\mu \parallel [a]$ при $T > T_п$, $T_п = 20$ К $\mu \parallel (001)$ $\alpha(\mu, [a]) = 60°$ при $T < T_п$; КС (Nd), $\mu \parallel [c]$	224 (Cr) 10 (Nd)	$\theta = -292$ К, $p = 2{,}81$ μ_{Cr} (4,2 К) $= 2{,}55\mu_B$ μ_{Nd} (4,2 К) $= 1{,}3\mu_B$	[3, 17, 63]
$SmCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС, $\mu \parallel [a]$ при $T > T_п$, $T_п = 38$ К $\mu \parallel [c]$ при $T < T_п$	192 (Cr)	—	[3, 17]
$EuCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	181 (Cr)	—	[17]
$GdCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	170 (Cr)	$\theta = -20$ К, $p = 2{,}8$	[17, 63]
$TbCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС (Cr) НКС (Tb) при $T > T_п$ КС (Tb) при $T < T_п$, $T_п = 3$ К	158 (Cr) 4 (Tb)	$\theta_{Cr} = -110$ К $\mu_{Cr^{3+}}$ (4,2 К) $= 2{,}85\mu_B$ $\mu_{Tb^{3+}}$ (1,5 К) $= 8{,}6\mu_B$	[3, 17]
$DyCrO_3$	Орторомбнческая D_{2h}^{16}	КС (Cr) $\mu_{Cr} \parallel [c]$ НКС (Dy)	146 (Cr) 2,1 (Dy)	$\theta_{Cr} = -35$ К, $\mu_{Cr^{3+}}$ (1,5 К) $= 2{,}76\mu_B$ $\theta_{Dy} = -1$ К, μ_{Dy} (1,5 К) $= 9{,}6\mu_B$	[3, 17]
$HoCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	Изменение структуры Cr при $T_п = 80$ К НКС (Ho)	141 (Cr) 12 (Ho)	$\theta_{Cr} = -28$ К, μ_{Cr} (4,2 К) $= 2{,}94\mu_B$ μ_{Ho} (4,2 К) $= 7\mu_B$ — АФ-компонента μ_{Ho} (4,2 К) $= 3{,}4\mu_B$ — Ф-компонента	[3, 17]

[*1] Значение поля опрокидывания подрешеток.

[*2] При $T = 4{,}2$ К магнитные моменты Pr обладают ферромагнитным упорядочением.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$ErCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС (Cr) $\mu \parallel [a]$ при $T > T_п = 20$ К $\alpha(\mu, [a]) = 55°$ при $T < T_п$ КС (Er)	133 (Cr) 16,8 (Er)	$\mu_{Cr^{3+}}$ (4,2 К) $= 2{,}90\mu_B$ $\mu_{Er^{3+}}$ (4,2 К) $= 5{,}2\mu_B$	[3, 17]
$TmCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС (Cr)	124 (Cr) T_c=4 К (Tm)*1	$\mu_{Cr^{3+}}$ (4,2 К) $= 2{,}58\mu_B$ $\mu_{Tm^{3+}}$ (4,2 К) $= 0{,}8\mu_B$	[3]
$YbCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС (Cr)	158 (Cr) 3,0 (Yb)	μ_{Cr} (4,2 К) $= 2{,}80\mu_B$	[3, 17]
$LuCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\mu \parallel (010)$ $\alpha(\mu, [a]) = 63°$	112 (Cr)	μ_{Cr} (4,2 К) $= 2{,}51\ \mu_B$	[3, 17]
$PbCrO_3$	Кубическая O_h^1	G-тип МП $(2a, 2a, 2a)$	210—250	$\theta = -240$ К, $p = 2{,}83$ μ_{Cr} (4,2 К) $= 1{,}9\ \mu_B$	[3, 17]
$CrVO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{17}	ФВ в (001) АФВ между (001)	50	$\mu_{Cr^{3+}}$ (4,2 К) $= 2{,}1\ \mu_B$, $p = 4$	[3, 17]
$CrUO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{14}	КС, $\mu \perp [c]$	45	$\mu_{Cr} = 2{,}4\ \mu_B$	[3, 17]
$CrNb_4S_8$	Гексагональная D_{6h}^4	КС ФВ в (001) АФВ между (001)	—	$\theta = -4$ К при низких температурах $\theta = -243$ К при высоких температурах μ_{Cr} (4,2 К) $= 1{,}5\ \mu_B$	[3]
Cr_2BeO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	ГС, $\mathbf{k}_0 \parallel [c]$ $\mu \parallel (010)$	28	$\mu_{Cr\ I}$ (4,2 К) $= 1{,}55\ \mu_B$ $\mu_{Cr\ II}$ (4,2 К) $= 2{,}75\ \mu_B$	[3]
$MgCr_2O_4$	Кубическая O_h^7 (тетрагональные искажения при $T < T_N$)	НКС, $\mu \perp (001)$ при $T_N > T > 13{,}5$ К*2	16	$\theta = -350$ К, $p = 3{,}84$ $\mu_{Cr^{3+}}$ (4,2 К) $= 2{,}63\ \mu_B$	[3]
$CoCr_2O_4$	Кубическая O_h^7	НКС при $T < T_N$ $(3a, 3a, a)$	31 Ф → АФ	Ферримагнетик при $T_N < T < T_C = 97$ К	[3]
$ZnCr_2O_4$	Кубическая O_h^7 (тетрагональные искажения при $T < T_N$)	НКС $\mu \parallel (100)$ $\mu \parallel [010]$ $(2a, 2a, 2a)$	16	$\theta = -392$ К	[3, 17]
Cr_2TiS_4	Моноклинная C_{2h}^3	$(2a, b, 2c)$	—	—	[3]

*1 При $T < T_C$ магнитные моменты Tm обладают ферромагнитным упорядочением.

*2 При $T = 13{,}5$ К — перестройка АФ-структуры.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
Cr_2NiS_4	Моноклинная C_{2h}^3	ФВ в (101) АФВ между (101) ($2a$, b, $2c$)	—	—	[3]
$ZnCr_2S_4$	Кубическая O_h^7	—	20	$\theta = 18$ К	[65]
$HgCr_2S_4$	Кубическая O_h^7	НКС при $T < 25$ К	25 Ф → АФ	Ферромагнетик при $25\text{ К} < T < T_C = 60$ К $\mu_{Cr^{3+}}(4{,}2\text{ К}) = 2{,}71\mu_B$	[3]
$ZnCr_2Se_4$	Кубическая O_h^7	НКС при $T < T_N$ $\mu \parallel (001)$	22 (Ф → АФ)	$\theta = -115$ К, $\mu_{Cr}(4{,}2\text{ К}) = 3\mu_B$ Ферримагнетик при $T_N < T < T_C = 129$ К	[3, 17]
Cr_2TeO_6	Тетрагональная D_{4h}^{14}	НКС, $\mu \perp C$	105	$\mu_{Cr^{3+}}(4{,}2\text{ К}) = 2{,}45\mu_B$	[3, 17]
Cr_2WO_6	Тетрагональная D_{4h}^{14}	НКС, $\mu \perp C$	69	$\theta = -196$ К, $\mu_{Cr^{3+}}(4{,}2\text{ К}) = 2{,}14\mu_B$	[3]
$CrTiNdO_5$	Орторомбическая D_{2h}^9	НКС $\mu_{Cr\ I} \parallel [b]$ $\mu_{Cr\ II} \parallel [c]$ $\mu_{Nd} \parallel (001)$	30 (Cr) 13 (Nd)	$\mu_{Nd}(1{,}5\text{ К}) = 2{,}89\mu_B$ $\mu_{Cr}(1{,}5\text{ К}) = 2{,}95\mu_B$	[3]
$CrK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	Кубическая T_h^6	—	0,004	$\chi_M(T_N)/4\pi = 2 \cdot 10^3$ см^3/моль	[17]
$Cr(CH_3NH_3) \cdot (SO_4)_2 \cdot 12H_2O$		—	0,02	—	[17]
α-Mn	Кубическая T_d^3	Сложная многоподрешеточная	100	$\mu(0\text{К}) \approx 0{,}5\mu_B$ (усредненное значение)	[2, 3]
γ-Mn	Кубическая O_h^5	I тип МП	1370	$\mu = 2{,}4\mu_B$, устойчив при $1352\text{ К} < T < 1416$ К	[3]
MnO	Кубическая O_h^5 (ромбоэдрические искажения при $T < T_N$)	$\mu \parallel [110]$ II тип МП ($2a$, $2a$, $2a$)	113—120	$\theta = -698$ К, $p = 5{,}97$ $\lambda(0) = 362$ мкм $\mu_{Mn^{2+}} = 5\mu_B$ $^{55}\nu_{Mn}(1{,}5\text{ К}) = 618$ МГц*1	[3, 17]
MnP	Орторомбическая D_{2h}^{16}	ГС, $\mathbf{k}_0 \parallel [a]$ при $T < T_N$	47 (Ф → АФ)	Ферромагнетик при $T_N < T < T_C = 291$ К $\mu_0 H_{c,[c]}(4{,}2\text{ К}) = 0{,}24$ Тл $\mu_0 H_{c,[b]}(4{,}2\text{ К}) = 0{,}62$ Тл	[3, 17]

*1 См. приложение II в [8].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
α-MnS	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel (111)$ $(2a, 2a, 2a)$	146—155	$\theta = -465$ К, $\mu_{Mn^{2+}}(4{,}2\text{ К}) = 5\mu_B$	[3]
β-MnS	Кубическая T_d^3	III тип МП $(a, 2a, a)$	150	$\theta = -982$ К, $\mu_{Mn^{2+}}(4{,}7\text{ К}) = 5\,\mu_B$ $\chi_м(T_N)/4\pi = 6\cdot10^{-3}$ см³/моль	[3, 17]
MnSe	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \perp [111]$ $(2a, 2a, 2a)$	147—150	$\theta = -740$ К, $\chi_м(T_N)/4\pi = 19\cdot10^{-3}$ см³/моль Полупроводник, $E_g = 0{,}68$ эВ	[3, 17]
MnTe	Гексагональная D_{6h}^4	ФВ в (001) АФВ между (001) $\mu \parallel (001)$	307—310	$\theta = -692$ К, $p = 5{,}97$ $\chi_м(T_N)/4\pi = 4{,}6\cdot10^{-3}$ см³/моль $\mu_{Mn^{2+}}(290\text{ К}) = 4{,}6\,\mu_B$ Полупроводник, $E_g = 1$ эВ	[3, 17]
MnNi	Тетрагональная D_{4h}^1	$\mu \perp C$	1070—1140	$\mu_{Mn}(0\text{К}) = 4\mu_B$ $\mu_{Ni}(0\text{К}) < 0{,}6\,\mu_B$	[3, 17]
γ-MnNi	Кубическая O_h^5	—	453	$\mu_{Mn} = 1{,}5\mu_B$	[3]
MnCu	Тетрагональная	$\mu \parallel C$	300	Сплав (69—85% Mn)	[17]
MnPd	Тетрагональная D_{4h}^1	*1	813—825	$\mu_{Mn}(4{,}2\text{ К}) = 4{,}0\mu_B$ $\mu_{Pd}(4{,}2\text{ К}) < 0{,}2\mu_B$	[3]
MnRh	Кубическая O_h^1 (тетрагональные искажения при $T < T_N$)	—	170	$\theta = -260$ К	[17]
MnPt	Тетрагональная D_{4h}^1	Изменение структуры при $T = 710$ К $(2a, 2a, c)$	970	$\mu_{Mn}(290\text{ К}) = 4{,}3\mu_B$	[3]
β-MnAu	Тетрагональная O_h^1	A-тип МП $(a, a, 2a)$	513	$\theta = -600$ К, $p = 3{,}9$ $\chi_м(T_N)/4\pi = 4{,}3 \times 10^{-3}$ см³/моль	[3, 17]
MnHg	Кубическая O_h^1	G-тип МП $\mu \parallel [001]$ при $T < 198$ К $\mu \parallel [111]$ при $T > 198$ К $(2a, 2a, 2a)$	460	$\chi_м(T_N)/4\pi = 9{,}4\times \times 10^{-3}$ см³/моль $\rho(T_N) = 5\cdot10^{-7}$ Ом·м $\mu_{Mn}(4{,}2\text{ К}) = 3{,}7\mu_B$	[3, 17]

*1 Возможные магнитные структуры см. в [3].

Вещество	Структура		T_N, T	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
IrMn	Тетрагональная D_{4h}^1	АФВ в (001)	>1200	μ_{Mn} (290 K) $= 3{,}4\mu_B$ μ_{Ir} (290 K) $= 0{,}2\mu_B$ (49% Ir)	[3]
MnB_2	Гексагональная D_{6h}^1	$\mu \perp C$ ФВ в (001) АФВ между (001) $(a, a, 2c)$	>885	μ_{Mn} (77 K) $= 2{,}6\mu_B$	[3]
β-MnO_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	ГС	84—94	$\theta = 1050$ K, $p = 5{,}52$	[3, 17]
MnS_2	Кубическая T_h^6	III тип МП $\mu \parallel [010]$ $(a, 2a, a)$	48	$\theta = -592$ K, $p = 6{,}3$ $\mu_{Mn^{2+}}$ (4,2 K) $= 5\mu_B$	[3, 17]
$MnSe_2$	Кубическая T_h^6	$\mu \parallel [010]$ $(a, 3a, a)$	75	$\theta = -483$ K, $p = 5{,}93$ $\mu_{Mn^{2+}}$ (4,2 K) $= 5\mu_B$	[3, 17]
$MnTe_2$	Кубическая T_h^6	I тип МП $\mu \parallel (001)$	84	$\theta = -528$ K, $p = 6{,}22$ $\mu_{Mn^{2+}}$ (4,2 K) $= 5\mu_B$	[3, 17]
MnF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel C$	67,3	$\theta = -113$ K, $\chi_{M\perp}$ (0K) $/4\pi =$ $= 25 \cdot 10^{-3}$ см^3/моль, λ (0) $= 1{,}11$ мм $\mu_0 H_{c\parallel}$ (4,2 K) $= 9{,}33$ Тл $\mu_0 \Delta H_{рез} = 3 \cdot 10^{-4}$ Тл при $\nu_{АФМР} = 23$ ГГц $55\nu_{Mn}$ (0K) $= 680$ МГц[*1]	[3, 17]
$MnCl_2$	Тригональная D_{3d}^5	$\alpha(\mu, C) = 57°$ при $T < T_N$ $\mu \parallel [a]$ при $T < T_п =$ $= 1{,}82$ K	1,96	$\theta = -3{,}3$ K, $p = 5{,}73$	[3, 17]
$MnBr_2$	Тригональная D_{3d}^3	КС[*2]	2,16	$\theta = -4{,}66$K, μ_{Mn} (1,35 K) $= 5\mu_B$	[3, 17]
MnI_2	Тригональная D_{3d}^3	ГС[*3]	3,4	μ_{Mn} (1,3 K) $= 4{,}6\mu_B$	[3, 17]
$MnSn_2$	Тетрагональная D_{4h}^{18}	Изменение структуры при $T = 73$ K	323—325	μ_{Mn} (4,2 K) $= 2{,}33\mu_B$	[3, 17]
$MnAu_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	ГС	363—370	$\mu_{Mn^{2+}}$ (290 K) $= 3{,}04\mu_B$	[3, 17]

[*1] См. приложение II в [8].
[*2] Плоскости (011) с ферромагнитным упорядочением чередуются в последовательности $++--$.
[*3] Ферромагнитное упорядочение в плоскости (307). Магнитные моменты в соседних плоскостях (307) повернуты на угол $\pi/16$.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
MnF_3	Моноклинная C_{2h}^6	$\mu \parallel (101)$	47	$\theta = 8$ К, $p = 5$ $\mu_{Mn^{3+}}$ (4,2 К) $= 4\mu_B$	[3, 17]
α-$MnZn_3$	Кубическая O_h^1 (тетрагональные искажения при $T < T_N$)	А-тип МП (a, a, $2a$)	155	—	[3]
$MnPd_3$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \perp C$	220	μ_{Mn} (77 К) $= 4{,}1\mu_B$	[3]
$MnAu_3$	—	—	145	$\theta = 200$ К	[17]
Mn_2N	Орторомбическая D_{2h}^{14}	НКС	301	μ_{Mn} (120 К) $= 1{,}6\mu_B$	[3]
Mn_2P	Гексагональная D_{3h}^3	—	103—110	$\mu_{Mn\ I}$ (4,2 К) $= 0{,}02\mu_B$ $\mu_{Mn\ II}$ (4,2 К) $= 1{,}68\mu_B$	[3]
Mn_2As	Тетрагональная D_{4h}^7	$\mu \parallel (001)$ (a, a, $2c$)	573	$\theta = -1947$ К, $p = 2{,}58$ $\mu_{Mn\ I}$ (290 К) $= 3{,}7\mu_B$ $\mu_{Mn\ II}$ (290 К) $= 3{,}5\mu_B$	[3, 17]
YMn_2	Кубическая O_h^7	—	100	$\mu_{Mn} = 2{,}7\mu_B$	[65]
Mn_2O_3	Кубическая T_h^7	—	80	—	[17]
Au_5Mn_2	Моноклинная C_{2h}^3	—	353	$\theta = 120$ К, $p = 5{,}56$	[3]
Mn_2Hg_5	Тетрагональная D_{4h}^5	ФВ в (001) АФВ между (001) $\mu \perp C$	342	μ_{Mn} (4,2 К) $= 4{,}5\mu_B$	[3]
Mn_3Rh	Кубическая O_h^1	НКС $\mu \parallel (111)$	853	μ_{Mn} (4,2 К) $= 3{,}5\mu_B$	[3]
Mn_3Sn	Гексагональная D_{6h}^4	ГС, $\mathbf{k}_0 \parallel C$ при $T < T_п =$ $= 270$ К	420	μ_{Mn} (4,2 К) $= 2{,}5\,\mu_B$	[3]
Mn_3Pt	Кубическая O_h^1	КС при $T > T_п$ НКС при $T < T_п$ $T_п = 365$ К	475	μ_{Mn} (77 К) $= 3{,}0\,\mu_B$	[3]
Pd_3Mn_2	—	—	593	$\theta = -430$ К $\chi_м(T_N)/4\pi =$ $= 2 \cdot 10^{-5}$ см^3/моль	[17]

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
Mn_3Ge_2	—	—	164 (Ф → АФ)	Ферромагнетик при $T_N < T < T_C = 283$ К $\Delta\sigma$ (164 К) = 3,5 А·м²/кг	[17]
Mn_5Si_3	Гексагональная D^3_{6h}	$\mu \perp C$ ($2a$, a, c)	62—68	$\theta = -9{,}1$ К, $p = 4{,}05$ $\mu_{Mn\ I}$ (4,2 К) = 0,4 μ_B μ_{MnII} (4,2 К) = 1,2 μ_B	[3]
MnOOH	Моноклинная C^2_{2h}	Модулированная с периодом 0,488 нм	40	—	[3]
FeMnAs	Тетрагональная D^7_{4h}	$\mu \perp C$ (a, a, $2c$)	463	μ_{Fe} (290 К) = 0,2 μ_B μ_{Mn} (290 К) = 3,6 μ_B	[3]
CuMnSb	Кубическая T^2_d	III тип МП $\mu \parallel [111]$ ($2a$, $2a$, $2a$)	38	μ_{Mn} (4,2 К) = 3,9 μ_B	[3]
$MnCO_3$	Тригональная D^6_{3d}	$\sigma \perp C$ (анизотропия типа ЛП)	32,5	$\theta = -64{,}5$ К, σ(0К) = = 18,8·10² А·м²/моль λ (0) = 2,44 мм $\mu_0 H_D = 0{,}44$ Тл $^{55}\nu_{Mn}$ (4,2 К) = 640 МГц*1	[3, 17, 31]
$MnSiO_3$	Триклинная	—	—	$\theta = -45$ К, $p = 5{,}91$	[17]
$CaMnO_3$	Кубическая O^1_h	С-тип МП ($2a$, $2a$, $2a$)	123—130	$\theta = -425$ К, σ(0К) ≠ 0 $\chi_м(T_N)/4\pi$ = = 4,7·10⁻³ см³/моль $\mu_{Mn^{4+}} = 2{,}43\ \mu_B$	[3, 17]
Ca_2MnO_4	Тетрагональная D^{17}_{4h}	$(a\sqrt{2}, a\sqrt{2}, 2c)$	114	$\mu_{Mn^{4+}}$ (4,2 К) = 2,0 μ_B	[3]
$ScMnO_3$	Гексагональная C^3_{6v}	НКС	120	μ_{Mn} (4,2 К) ≈ 4,0 μ_B	[3, 17]
$MnTiO_3$	Тригональная C^2_{3i}	$\mu \parallel [111]$	60—65	$\theta = -219$ К, $p = 5{,}93$ $\mu_{Mn^{2+}}$ (4,2 К) = 4,55 μ_B $\mu_0 H_{c\parallel} = 5{,}2$ Тл	[3, 17]
$MnGeO_3$	Орторомбическая D^{15}_{2h}	$\mu \parallel [b]$	16	$\theta = -46$ К, p=5,48 $\mu_{Mn\ I}$ (1,1 К) = 4,37 μ_B $\mu_{Mn\ II}$ (1,1 К) = 4,27 μ_B	[3, 17]
$MnYO_3$	Гексагональная C^3_{6v}	$\mu \perp C$	46	$\theta = -475$ К, σ (0 К) ≠ 0	[3, 17]

*1 См. приложение II в [8].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$BaMnO_3$	Гексагональная D_{6h}^4	КС, $\mu \parallel C$ $(a\sqrt{3},\ a\sqrt{3},\ c)$	2,3	μ_{Mn} (1,8 К) $= 3{,}0\mu_B$	[3]
$SrMnO_3$	Кубическая O_h^1	G-тип МП $(2a,\ 2a,\ 2a)$	260	$\mu_{Mn^{4+}}$ (77 К) $= 2{,}6\mu_B$	[3]
$LaMnO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС A_xF_y-тип МП	100—150	$\theta = 40$ К, σ (0К) $=$ $= 1{,}21$ А·м²/моль $\chi_M(T_N)/4\pi = 48{,}4 \times$ $\times 10^{-3}$ см³/моль $\mu_{Mn^{3+}}$ (4,2 К) $= 3{,}7\mu_B$	[3, 17]
$PrMnO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\mu \parallel [b]$	91	$\mu_{Mn^{3+}}$ (1,5 К) $= 1{,}77\mu_B$	[3]
$NdMnO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\mu \parallel (001)$ $\alpha(\mu, [b]) = 36°$	85	$\mu_{Mn^{3+}}$ (1,5 К) $= 1{,}71\mu_B$	[3]
$HoMnO_3$	Гексагональная C_{6v}^3	$\mu \parallel C$ при $T < T_п = 50$ К $\mu \perp C$ при $T > T_п$	76	μ_{Mn} (4,2 К) $= 3{,}5\mu_B$	[3, 17]
$ErMnO_3$	Гексагональная C_{6v}^3	НКС $\alpha(\mu, C) = 70°$	79	μ_{Mn} (4,2 К) $= 3{,}5\mu_B$	[3, 17]
$TmMnO_3$	Гексагональная C_{6v}^3	НКС $\alpha(\mu, C) = 45°$	86	μ_{Mn} (4,2 К) $= 3{,}8\mu_B$	[3, 17]
$LuMnO_3$	Гексагональная C_{6v}^3	НКС $\alpha(\mu, C) = 55°$	91	μ_{Mn} (4,2 К) $= 3{,}7\mu_B$	[3, 17]
$NaMnF_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	G-тип МП $\sigma \parallel [c]$	67	$\mu_0 H_E = 39{,}0$ Тл $\mu_0 H_D = 0{,}43$ Тл $\mu_0 H_A = 2 \cdot 10^{-2}$ Тл	[3, 17]
$KMnF_3$	Тетрагональная D_{4h}^5 при $T < 91$ К	G-тип МП $(2a,\ 2a,\ 2a)$	88	$\theta = -238$ К σ_M (4,2 К) $= 19{,}3 \times$ $\times 10^{-3}$ А·м²/моль[*1] $\chi_M(T_N)/4\pi = 17{,}7 \times$ $\times 10^{-3}$ см³/моль $\mu_{Mn^{2+}}$ (4,2 К) $= 5{,}06\mu_B$ $\mu_0 H_D = 4{,}5 \cdot 10^{-2}$ Тл $\mu_0 H_E = 86{,}8$ Тл $^{55}\nu_{Mn}$ (4,2 К) $= 676$ МГц[*2]	[3, 6, 17]
$RbMnF_3$	Кубическая O_h^1	G-тип МП $\mu \parallel [111]$ $(2a,\ 2a,\ 2a)$	83	$\theta = -118$ К $\mu_0 H_{c\parallel} = 0{,}28$ Тл $\mu_0 H_A = 4 \cdot 10^{-4}$ Тл $\mu_0 H_E = 89$ Тл $\chi_M(T_N)/4\pi = 17{,}7 \times$ $\times 10^{-3}$ см³/моль	[3, 6, 17, 66]

[*1] Спонтанный момент в $KMnF_3$ появляется при температуре $T = 81{,}5$ К. Изменение структуры при $T_c = 81{,}5$ К представляет собой фазовый переход первого рода.

[*2] См. приложение 11 в [8].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$CsMnF_3$	Гексагональная D_{6h}^4	Анизотропия типа ЛП $\mu \perp C$	51—54	$\mu_0 H_{A\parallel} = 0{,}75$ Тл*1 $\mu_0 H_{A\perp} = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$ Тл $\mu_0 H_E = 35$ Тл $^{55}\nu_{Mn}$ (4,2 К) = 666 МГц*2 Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 3$	[3, 6, 17, 66]
$TlMnF_3$	Кубическая O_h^1	G-тип МП	77	$\theta = -125$ К, $\mu_0 H_E = 68{,}0$ Тл $\mu_0 H_A = 0{,}67$ Тл μ (4,2 К) $= 4{,}9\mu_B$	[17]
NH_4MnF_3	Кубическая O_h^1	G-тип МП ($2a$, $2a$, $2a$)	84	—	[3]
$NaMnCl_3$	Тригональная C_{3i}^2	$\mu \perp C$ (анизотропия типа ЛП)	6,5	$\theta = 1$ К	[6]
$KMnCl_3$	Тетрагональная *3 D_{4h}^{17} ($[c]/[a]$) = 1,005	—	100	$\theta = -122$ К, $\mu_0 H_E = 122$ Тл	[6, 17]
$KMnCl_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	ГС, $k_0 \parallel [b]$ с периодом 3,17 $[b]$	2,1	μ_{Mn} (1,4 К) $= 3{,}78\mu_B$	[67]
$RbMnCl_3$	Гексагональная*4 D_{6h}^4	$\mu \perp C$ (анизотропия типа ЛП)	95	$\theta = -204$ К Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга $\Delta\sigma_\parallel$ (4,2 К) = $= 4 \cdot 10^{-3}$ А·м²/моль при $\mu_0 H_\perp = 0{,}63$ Тл	[6, 17]
$CsMnCl_3$	Тригональная D_{3d}^5	$\mu \perp C$ (анизотропия типа ЛП)	67—70	$\theta = -145$ К, $\mu_0 H_E = 70{,}0$ Тл $\mu_0 H_{c\perp} = 5{,}26$ Тл $\mu_0 H_{A\parallel} = 0{,}74$ Тл	[6, 17]
$TlMnCl_3$	Орторомбическая C_{4v}^{10}	G-тип МП	118*5	$\theta = -259$ К, μ_{Mn} (77 К) $= 4{,}7\mu_B$ $\mu_0 H_D = 0{,}16$ Тл при $T_c = 108$ К*5 переход АФ → СФ	[3, 6]
NH_4MnCl_3	Кубическая O_h^1 (орторомбические искажения при $T < T_N$)	G-тип МП ($2a$, $2a$, $2a$)	105	μ_{Mn} (4,2 К) $= 5\mu_B$	[3, 17]

*1 $\mu_0 H_A = 2{,}48 \cdot 10^{-1}$ Тл, где H_A — поле анизотропии, полученное из измерения высокочастотной ветви АФМР [117].

*2 См. приложение II в [8].

*3 По данным [67] структура перовскита — пространственная группа D_{2h}^{16}.

*4 Гексагональная структура при комнатной температуре. При $T = 272$ К из оптических измерений обнаружен структурный переход $D_{6h}^4 \rightarrow C_{2h}^2$ [118].

*5 T_N и T_C указаны в соответствии с [3], $T_N = T_C \approx 110$ К — по данным [6].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$CsMnBr_3$	Гексагональная D_{6h}^4	ГС, $\mathbf{k}_0 \parallel C$ $(a\sqrt{3},\ a\sqrt{3},\ c)$	8,3	$\theta = -167$ К, $J/k = 9{,}9$ К Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$	[6]
$TlMnI_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	ГС, $\mathbf{k}_0 \parallel \mathbf{b}$*1 $\boldsymbol{\mu} \parallel (001)$	6,0	$\theta = 10{,}6$ К, $p = 5.9$	[68]
$MnSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{17}	ГС, $\mathbf{k}_0 \parallel [a]$ с периодом 3 нм	11	$\mu_{Mn^{2+}}$ (4,2 К) $= 4{,}8\mu_B$	[3, 17]
$MnSeO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\boldsymbol{\mu} \parallel (001)$	20	μ_{Mn} (4,2 К) $= 4{,}95\mu_B$	[3]
$MnWO_4$	Моноклинная C_{2h}^4	$(4a,\ 2b,\ 2c)$	14—16	$\theta = -71$ К, $p = 5{,}83$	[3]
$MnUO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{28}	$\boldsymbol{\mu} \parallel [b]$	12	$\theta = -8$ К, μ_{Mn} (4,2 К) $= 4{,}88\ \mu_B$ $\chi_M(T_N)/4\pi = 0{,}2$ см^3/моль	[3, 17]
$BaMnF_4$	Орторомбическая C_{2v}^{12}*1	НКС	26	μ (4,7 К) $= 4{,}8\mu_B$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$	[6, 120]
$Mn(OH)_2$	Тригональная D_{3d}^3	НКС $(a\sqrt{3},\ a\sqrt{3},\ 2c)$	12	$\theta = -28$ К, μ_{Mn} (4,2 К) $= 4{,}9\mu_B$	[3, 17]
$MnAl_2O_4$	Кубическая O_h^7	$\boldsymbol{\mu} \parallel [100]$	6	$\theta = -156$ К, $p = 5{,}13$ $\mu_{Mn^{2+}}$ (4,2 К) $= 3{,}91\mu_B$	[3]
$MnGa_2O_4$	Кубическая O_h^7	$\boldsymbol{\mu} \parallel [111]$	33	$\theta = -154$ К, $p = 5{,}77$ $\mu_{Mn^{2+}}$ (4,2 К) $= 3{,}6\,\mu_B$	[3, 17]
α-$MnGa_2S_4$	Моноклинная C_{2h}^6	—	23,5	$\theta = -50$ К	[69]
β-$MnGa_2S_4$	Орторомбическая C_{2v}^9	—	11	$\theta = -28$ К	[69]
K_2MnF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\boldsymbol{\mu} \parallel C$ $(2a,\ 2a,\ c)$	42—45	μ_{Mn} (4,2 К) $= 4{,}54\,\mu_B$ $\lvert J'/J\rvert = 10^{-6}$, $kT_N/J = 10{,}1$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$	[3, 6]

*1 C_{2v}^{12} при $T > 247$ К; при $T = 247$ К — структурный фазовый переход в несоизмеримую фазу, при котором происходит удвоение ячейки в плоскости bc и возникает несоизмеримая модуляция структуры вдоль оси [a].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
Rb_2MnF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$ $(2a, 2a, c)$	38	$T_N/\theta = 0{,}44$, $\lvert J'/J\rvert = 10^{-6}$, $kT_N/J = 10{,}3$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$	[3, 6]
Rb_2MnCl_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$ $(2a, 2a, c)$	56	$T_N/\theta = 0{,}39$ μ_{Mn} (4,2 К) $= 4{,}4\mu_B$ $J'/J = 10^{-6}$, $kT_N/J = 9{,}2$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$	[3, 6]
Cs_2MnCl_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$ $(2a, 2a, c)$	52	$p = 5{,}9$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$	[3]
α-Cs_2MnCl_4	Орторомбическая	—	0,93*1	$\theta = -4$ К	[17]
$MnNb_2O_6$	Орторомбическая D_{2h}^{14}	G_x-тип МП $(a, 2b, c)$	4,4	$\theta = -18$ К	[3, 17]
$MnTa_2O_6$	Орторомбическая D_{2h}^{14}	$G_x\,G_z$-тип МП $\alpha(\mu, [a]) = 10^{\circ}$	—	—	[3]
Pd_2MnAl	Кубическая O_h^1	II тип МП	240	μ_{Mn} (4,2 К) $= 4.4\,\mu_B$	[3]
Pd_2MnIn	Кубическая O_h^5	II тип МП $(2a, 2a, 2a)$	142	$\theta = -50$ К, μ_{Mn} (4,2 К) $= 4{,}3\,\mu_B$	[3]
$Mn(C_2H_5)_2$	—	—	134	$\theta = -492$ К, $p = 7{,}18$	[17]
Mn_2SiO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС*2 $\mu \parallel [a]$ при $T > T_n$, $T_n = 13$ К НКС при $T < T_n$	50	$\theta = -163$ К, $p = 5{,}87$ $\mu_{Mn^{2+}}(4{,}2\text{ К}) = 5\,\mu_B$	[3, 17]
$CaMn_2O_4$	Орторомбическая D_{2h}^{11}	КС, $\mu \nparallel [a]$ $(2a, b, c)$	225	$\theta = 294$ К, $p = 4{,}72$ μ_{Mn} (4,2 К) $= 3{,}6\,\mu_B$	[3]
Mn_2GeO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС	24	$\theta = -162$ К, $p = 5{,}85$	[3]
$ZnMn_2O_4$	Тетрагональная D_{4h}^{19}	—	200	—	[64, с. 325]

*1 Из измерений теплоемкости.

*2 $\mu_{Mn\ I} \parallel [a]$, $\mu_{Mn\ II}$ образуют скошенную АФ-структуру при $T < T_n = 20$ К. КС при $T_n < T < T_N = 47$ К [116].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$BiMn_2O_5$	Орторомбическая D_{2v}^7	НКС ($2a$, b, c)	52	$\theta = -236$ К	[3]
Mn_2GeS_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, G_y-тип МП	—	μ_{Mn} (4,2 К) $= 4{,}7\,\mu_B$	[3]
$ThMn_2Si_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	КС, $\mu \parallel C$	483	$p = 2{,}4$, $\mu_{Mn} = 1{,}75\,\mu_B$	[3]
$ThMn_2Ge_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	НКС	400	$p = 2{,}4$	[3]
Cu_3Mn_2Al	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel (001)$	873	μ_{Mn} (4,2 К) $= 4{,}5\mu_B$	[3]
Mn_3B_4	Орторомбическая D_{2h}^{25}	КС при 226 К $< T < T_N$ ГС при 110 К $< T <$ 226 К $\mathbf{k}_0 \parallel [b]$ КС при $T <$ 110 К $\mu \parallel [c]$	392	$\theta = -543$ К, $\mu_{Mn\ I}$ (4,2 К) $= 2{,}92\mu_B$ $\mu_{Mn\ II}$ (4,2 К) $= 0{,}44\mu_B$	[3]
Mn_3GaC	Кубическая O_h^1	КС, $\mu \parallel [111]$ ($2a$, $2a$, $2a$)	150—164 (Ф → АФ)	μ_{Mn} (4,2 К) $= 1{,}8\mu_B$ Ферромагнетик при $T_N < T < T_c = 248$ К	[3, 17]
Mn_3NiN	Кубическая O_h^1	НКС (изменения структуры при $T = 180$ К)	—	μ_{Mn} (77 К) $= 0{,}98\mu_B$	[3]
Mn_3ZnN	Кубическая O_h^1	НКС (изменение структуры при $T = 140$ К)	$T_N = 183$ К	$\mu_{Mn\ I} = 1{,}21\mu_B$ при 140 К $< T < T_N$ $\mu_{Mn\ I}$ (4,2 К) $= 0{,}61\mu_B$ $\mu_{Mn\ II}$ (4,2 К) $= 1{,}0\mu_B$	[3, 17]
Mn_3GaN	Кубическая O_h^1	НКС	298	μ_{Mn} (4,2 К) $= 2{,}34\mu_B$	[3]
$CsMn_3Cl_5$	Тетрагональная	—	0,59*1	$\theta = -0{,}9$ К	[17]
$Mn_3B_2O_6$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	—	35	$\theta = -185$ К, $p = 6{,}18$	[3]
$Nb_2Mn_4O_9$	Тригональная D_{3d}^4	КС $\mu \parallel C$	110*2 125	$\theta = -250$ К, $\mu_{Mn^{2+}}$ (4,2 К) $= 5\mu_B$ Магнитоэлектрик при 140 К $< T < T_N$	[3, 17]
$Ta_2Mn_4O_9$	Тригональная D_{3d}^4	—	103*2	Магнитоэлектрик	[17]
$Dy_2Mn_4O_9$	Орторомбическая D_{2h}^9	—	8	—	[17]

*1 Из измерений теплоемкости.
*2 Из измерений магнитоэлектрического эффекта.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$LiMnPO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС $\mu \parallel [100]$	35	$\theta = -80$ К, $p = 5{,}2$ $\chi_M(T_N)/4\pi = 33 \times$ $\times 10^{-3}$ см^3/моль	[3, 17]
$CuMnSnS_4$	Тетрагональная D_{2d}^{11}	КС $\mu \parallel (101)$ $(2a, a, c)$	—	$\mu_{Mn^{2+}}(290\ К) = 4{,}3\mu_B$	[3]
Ba_2MnUO_6	Кубическая O_h^5	ФВ в (001) АФВ между (001)	12,8	$\mu_{Mn} = 2{,}25\mu_B$	[3]
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	КС $\alpha(\mu, [c]) = 7°$	1,62	$\theta = -1{,}79$ К, $\mu_0 H_{c\parallel}(1{,}2\ К) =$ $= 0{,}25 \div 0{,}5$ Тл $^{54}\nu_{Mn} = 500{,}4$ МГц*[1]	[17]
$MnBr_2 \cdot 4H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	КС $\mu \parallel [c]$	2,136	$\mu_0 H_{c\parallel}(1{,}2\ К) =$ $= 0{,}75 \div 1{,}0$ Тл	[17]
$Mn_3Al_2Ge_3O_{12}$	Кубическая O_h^{10}	НКС*[2]	6,65	$\theta = -28$ К, $p = 5{,}89$ $c/\lambda(0) = 39$ ГГц*[3]	[121, 122]
α-$RbMnCl_3 \cdot 2H_2O$ (α-RMC)	—	КС	4,56	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$; $\lvert J/k \rvert = 3{,}0$ К, $\lvert J'/J \rvert = 7 \cdot 10^{-3}$ $\mu_0 H_{c\parallel} = 1{,}31$ Тл $\mu_0 H_E = 20{,}0$ Тл $\mu_0 H_A = 4{,}27 \cdot 10^{-2}$ Тл	[71]
$CsMnCl_3 \cdot 2H_2O$ (CMC)	Орторомбическая D_{2h}^8	КС	4,89	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$; $\lvert J/k \rvert = 3{,}2$ К, $\lvert J'/J \rvert = 8 \cdot 10^{-3}$ $\mu_0 H_{c\parallel} = 1{,}64$ Тл $\mu_0 H_E = 23{,}8$ Тл $\mu_0 H_A = 5{,}65 \cdot 10^{-2}$ Тл	[71]
$CsMnBr_3 \cdot 2H_2O$ (CMB)	Орторомбическая	КС	5,75	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$; $\lvert J/k \rvert = 3{,}0$ К, $\lvert J'/J \rvert = 11 \cdot 10^{-3}$ $\mu_0 H_{c\parallel} = 2{,}05$ Тл $\mu_0 H_E = 22{,}3$ Тл $\mu_0 H_A = 9{,}41 \cdot 10^{-2}$ Тл	[71]
$MnSiF_6 \cdot 6H_2O$	Тригональная C_{3i}^2	—	0,1	—	[17]

*[1] Наиболее сильная линия ($M = -3 \rightarrow M = -2$) в квадрупольно-расщепленном спектре ЯМР на ориентированных ядрах Mn [70].

*[2] Магнитные моменты марганца лежат в плоскости (111) и направлены вдоль или против осей [211], [121] и [112].

*[3] В [122] изучено поведение трех ветвей магнитного резонанса в $Mn_3Al_2Ge_3O_{12}$.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$Cs_2MnCl_4 \cdot 2H_2O$	Триклинная	—	1,80*1	—	[17]
$(CH_3)_4N \cdot MnCl_3$ (TMMC)	Гексагональная D^9_{6h} (моноклинные искажения при $T < 171$ К) структурный переход при $T = 45$ К	КС	0,84	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$; $\lvert J/k\rvert = 6{,}7$ К, $\lvert J'/J\rvert = 10^{-4}$ $\mu_0 H_{c\parallel} = 1{,}14$ Тл $\mu_0 H_E = 49{,}9$ Тл $\mu_0 H_A = 1{,}30 \cdot 10^{-2}$ Тл	[6, 71]
$(CH_3NH_3) \cdot MnCl_3 \cdot 2H_2O$ (MMC)	Моноклиниая C^5_{2h}	—	4,12	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$; $\lvert J/k\rvert = 3{,}01$ К, $\lvert J'/J\rvert = 6 \cdot 10^{-3}$	[72]
$(CH_3)_2NH_2 \cdot MnCl_3$ (DMMC)	—	КС	3,60	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$; $\lvert J/k\rvert = 6{,}5$ К, $\lvert J'/J\rvert = 10^{-3}$ $\mu_0 H_{c\parallel} = 1{,}83$ Тл $\mu_0 H_E = 48{,}4$ Тл $\mu_0 H_A = 3{,}46 \cdot 10^{-2}$ Тл	[71]
$(C_6H_5NH) \cdot MnCl_3$ (PMCA)	—	КС	2,32	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$; $\lvert J/k\rvert = 6{,}5$ К, $\lvert J'/J\rvert = 4 \cdot 10^{-4}$ $\mu_0 H_{c\parallel} = 1{,}0$ Тл $\mu_0 H_E = 48{,}4$ Тл $\mu_0 H_A = 1{,}03 \cdot 10^{-2}$ Тл	[71]
$Mn(C_2H_6O_2) \cdot 4H_2O$	Моноклинная C^5_{2h}	—	3,2	$\theta = -5{,}2$ К, σ_M (0 К) = $= 2{,}79$ А·м²/моль	[3, 17]
$Mn(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C^5_{2h}	$\mu \parallel (100)$	3,7*2	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$; $\lvert J/k\rvert = 0{,}35$	[17, 73]
$Mn(DCOO)_2 \cdot 2D_2O$	Моноклинная C^5_{2h}	$\sigma \parallel (101)$ при $T > T_п = 1{,}7$ К $\sigma \parallel [b]$ при $T < T_п$	3,7	$\mu_{Mn^{2+}}$ (2,5 К) = $= \mu_{Mn^{2+}}$ (1,5 К) $= 5{,}06\,\mu_B$	[3]
$Mn(NH_4)_2 \cdot (SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	Моноклинная	—	0,14	σ_M (0 К) $= 7{,}82$ А·м²/моль	[17]

*1 Из измерений теплоемкости.

*2 При этой температуре упорядочивается только часть магнитных моментов. Остальные моменты обусловливают парамагнитные свойства. При $T = 0{,}23$ К наблюдаются аномалии Шоттки в поведении теплоемкости.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
FeO	Кубическая O_h^5 (ромбоэдрические искажения при $T < T_N$)	II тип МП $\mu \parallel [111]$ $(2a, 2a, 2a)$	198	$\theta = -570$ К, $p = 4{,}6$ $\chi_м(T_N)/4\pi = 8 \cdot 10^{-3}$ см³/моль $\mu_{Fe^{2+}}(4{,}2\text{ К}) = 3{,}32\mu_B$	[3, 17]
FeSi	Кубическая T_4	—	523	$\theta = -149$ К, $p = 2{,}55$	[3, 17]
FeP	Орторомбическая D_{2h}^{16}	ГС, $\mathbf{k}_0 \parallel [c]$ $\mu \perp [c]$ $(a, b, 5c)$	125	$\theta = -50$ К, $\mu_{Fe\,I}(4{,}2\text{ К}) = 0{,}46\mu_B$ $\mu_{Fe\,II}(4{,}2\text{ К}) = 0{,}37\mu_B$	[3, 17]
FeS	Гексагональная D_{3h}^4	$\mu \parallel C$ при $T < T_п = 390$ К $\mu \perp C$ при $T > T_п$	593—600	$\theta = -917$ К, $\chi_м(T_N)/4\pi = 2{,}2 \times 10^{-3}$ см³/моль	[3, 17]
FeCo	Кубическая O_h^1	—	1253	$\mu_{Fe} = 2{,}9\mu_B$ $\mu_{Co} = 1{,}9\mu_B$	[3]
FeGe	Гексагональная D_{6h}^1	КС, $\mu \parallel C$ $(a, a, 2c)$	400—412	$p = 3{,}19\mu_{Fe}(4{,}2\text{ К}) = 1{,}67\mu_B$	[3]
FeAs	Орторомбическая D_{2h}^{16}	ГС, $\mathbf{k}_0 \parallel [c]$	77	$p = 3{,}1$, $\mu_{Fe}(4{,}2\text{ К}) = 0{,}5\mu_B$	[3]
FeSe	Гексагональная D_{6h}^4	—	847	Ферромагнетик при $T < 423$ К	[17]
FeSn	Гексагональная D_{6h}^1	ФВ в (001) АФВ между (001) $\mu \parallel (001)$ $(a, a, 2c)$	365—373	$\theta = -158$ К, $p = 4{,}5$ $\mu_{Fe}(4{,}2\text{ К}) = 1{,}55\mu_B$	[3]
FeRh	Кубическая O_h^1	G-тип МП $(2a, 2a, 2a)$	328 (Ф → АФ)	Ферромагнетик при $T_N < T < T_C = 668$ К $\Delta\sigma_{уд} = (328\text{ К}) = 117$ А·м²/кг $\rho(0\text{ К}) = 5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м	[3, 17]
FeF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel C$	78	$\theta = -117$ К, $\mu_{Fe^{2+}}(23\text{ К}) = 4\mu_B$ $\lambda(0) = 189$ мкм	[3, 17]
$FeCl_2$	Тригональная D_{3d}^5	ФВ в (001) АФВ между (001) $\mu \parallel C$ $(2a, 2a, 2a)$	23	$\theta = 48$ К, $p = 5{,}26$ $\mu_{Fe^{2+}}(4{,}2\text{ К}) = 4{,}2\,\mu_B$ Метамагнетик: $H_A > H_E$ $\mu_0 H_{c\parallel} = 1{,}05$ Тл	[3, 6, 17]
$FeBr_2$	Тригональная D_{3d}^3	ФВ в (001) АФВ между (001) $\mu \parallel c$ $(a, a, 2c)$	11	$\theta = 6$ К, $\mu_{Fe}(4{,}2\text{ К}) = 4{,}2\,\mu_B$ Метамагнетик: $H_A > H_E$ $\mu_0 H_{c\parallel} = 3{,}15$ Тл	[3, 6, 17]

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
FeI_2	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel C$	10	$\theta = -23$ К Метамагнетик: $H_A > H_E$ Поведение в магнитном поле описывается моделью с 8—12 подрешетками (4 фазовых перехода по магнитному полю)	[3, 6, 17]
FeP_2	Орторомбическая D_{2h}^{12}	—	250*1	$\theta = -17$ К, $\chi_м(T_N)/4\pi = 1{,}18 \cdot 10^{-3}$ см³/моль	[17]
$FeGe_2$	Тетрагональная D_{4h}^{18}	$\mu \parallel (001)$	270—315	$\theta = -510$ К, $\mu_{Fe}(4{,}2\text{ К}) \approx 1\mu_B$	[3, 17]
$FeSn_2$	Тетрагональная D_{4h}^{18}	$(2a, 2a, c)$	377—384	$\theta = -230$ К, $p = 3{,}36$ $\chi_м(T_N)/4\pi = 1{,}95 \cdot 10^{-3}$ см³/моль	[3, 17]
$FeTe_2$	—	—	85	$\theta = -320$ К, $p = 0{,}194$	[17]
FeF_3	Тригональная D_{3d}^6	КС, $\mu \parallel (111)$	362—365	$\mu_{Fe}(4{,}2\text{ К}) = 5\,\mu_B$	[3, 17]
$FeCl_3$	Тригональная C_{3i}^2	ГС	10	$\theta = -115$ К, $p = 5{,}73$ $\mu_{Fe^{3+}}(4{,}2\text{ К}) = 4{,}3\,\mu_B$	[3, 17]
$FePt_3$	Кубическая O_h^1	С-тип МП $(2a, 2a, a)$	120	$\mu_{Fe} = 3{,}3\,\mu_B$	[3, 17]
Fe_2As	Тетрагональная D_{4h}^7	$\mu \perp C$ $(a, a, 2c)$	368	$\theta = -90$ К, $p = 4{,}66$ $\mu_{Fe\,I}(290\text{ К}) = 1{,}28\,\mu_B$ $\mu_{Fe\,II}(290\text{ К}) = 2{,}05\,\mu_B$	[3]
α-Fe_2O_3	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel C$ при $T < T_M^{*2}$ $\mu \perp C$ при $T_M < T < T_N$	950—959	$\mu_{Fe}(4{,}2\text{ К}) = 4{,}9\,\mu_B$ $^{57}\nu_{Fe}(290\text{ К}) = 71{,}2$ МГц*3 $\sigma_м(300\text{ К}) = 3 \cdot 10^{-2}$ А·м²/моль $\mu_0 H_E = 900$ Тл $\mu_0 H_D = 2{,}2$ Тл $\mu_0 H_{c\parallel}(77\text{ К}) = 6{,}8$ Тл $\mu_0 H_{c\perp}(77\text{ К}) = 16$ Тл	[3, 17]
FeOF	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel C$	315	$\mu_{Fe^{3+}}(4{,}2\text{ К}) = 4{,}8\,\mu_B$	[3]

*1 Нет уверенности, что переход П → АФ.
*2 При $T = T_M = 262$ К переход СФ → АФ (см. сноску на с. 651).
*3 См. приложение II в [8].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
FeOCl	Орторомбическая D_{2h}^{13}	—	92,3	—	[17]
$LiFeO_2$	Тетрагональная D_{4h}^{19}	КС $\mu \parallel C$ при $T > T_п = 90$ К $\mu \parallel (111)$ при $T < T_п$	315	$\mu_{Fe^{3+}}$ (77 К) $= 4{,}5\,\mu_B$ $\mu_{Fe^{3+}}$ (4,2 К) $= 2{,}5\,\mu_B$ σ (0 К) $\neq 0$	[3, 17]
β-$FeNaO_2$	Орторомбическая C_{2v}^{9}	$\sigma \parallel [b]$ $\mu \parallel [c]$	723	μ_{Fe} (290 К) $= 4{,}2\,\mu_B$	[3, 17]
$CuFeS_2$	Тетрагональная D_{2d}^{12}	$\sigma \perp C$	815—823	$\mu_{Fe} = 3{,}85\,\mu_B$ $Eg = 2{,}5$ эВ	[3, 17]
$FeBO_3$	Тригональная D_{3d}^{6}	НКС $\mu \parallel (111)$ $\sigma \perp C$	348	μ_{Fe}(77 К) $= 4{,}7\,\mu_B$ $\mu_0 H_D$ (293 К) $= 6{,}2$ Тл $^{57}\nu_{Fe}$(77 К) $= 76{,}5$ МГц[*1]	[3, 17]
$FeCO_3$	Тригональная D_{3d}^{6}	КС $\mu \parallel C$	38	$\theta = -14$ К, $\mu_0 H_{c\parallel} =$ $= 15{,}3$ Тл Магнитные свойства соответствуют модели Изинга	[2, 3, 40, 74]
$FeTiO_3$	Тригональная C_{3i}^{2}	$\mu \perp [111]$ $(2a, 2a, 2a)$	68	$p = 5{,}23$	[3, 17]
$FeVO_3$	Тригональная D_{3d}^{6}	—	—	—	[17]
$YFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$	640—650	$\sigma_м$ (4,2 К) $= 0{,}30$ А·м²/моль $\mu_0 H_c$ (4,2 К) $= 7{,}25$ Тл[*2]	[3,17]
$LaFeO_3$[*3]	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ $[2a, 2b, 2c)$	738—750	$\theta = -480$ К, $\sigma_м$[*4] $= 0{,}24$ А · м²/моль	[3, 17]
$CeFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$, $T_п = 230$ К	719	—	[17]
$PrFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$	707—711	$p = 3{,}6$	[3, 17]
$NdFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [a]$ при $T > T_{п_1} = 160$ К $\mu \parallel [c]$ при $T < T_{п_2} = 70$ К $(2a, 2b, 2c)$	687—689	$p = 3{,}6$, $\mu_{Fe^{3+}}$ (43 К) $= 4{,}57\mu_B$	[3, 17]

[*1] См. приложение II в [8].
[*2] При $H = H_c$ происходит фазовый переход второго рода, заключающийся в изменении магнитной симметрии [75].
[*3] Обзор магнитных свойств ортоферритов ($RFeO_3$, где R — редкоземельный ион) дан в [76], магнитные ориентационные переходы в ортоферритах рассмотрены в [11].
[*4] Значения σ в $RFeO_3$ даны для $T < T_N$ (Fe), но $T > T_N$ (R).

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$SmFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_п$ $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$, $T_п = 470 \div 490$ К	672—674	$\sigma_м = 0{,}21$ А·м²/моль	[3, 17]
$EuFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$	666	$\sigma_м = 0{,}20$ А·м²/моль	[17]
$GdFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	A_x-тип МП при $T > T_п = 80$ К	657—670 (Fe) 2,6 (Gd)	$\theta = -4{,}3$ К, $p = 8$ $\sigma_м = 0{,}26$ А·м²/моль	[3, 17]
$TbFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$, $T_п = 8{,}4$ К (при $T = 3{,}1$ К изменение магнитной структуры подрешеток Tb)	650—681 (Fe) 8,3 (Tb)	$p = 9{,}7$ μ_{Fe} (97 К) $= 4{,}8\,\mu_B$ $\mu_{Tb^{3+}}$ (1,5 К) $= 8{,}6\,\mu_B$ $\sigma_м = 0{,}35$ А·м²/моль	[3, 17]
$DyFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$, $\sigma = 0$ при $T < T_п$, $T_п = 30 \div 40$ К[*1]	645—648 (Fe) 3,7 (Dy)	$\sigma_м = 0{,}33$ А·м²/моль Переориентация магнитной структуры при $T = T_п$ происходит скачком	[3, 17]
$HoFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_п$ $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$ $T_п = 51 \div 63$ К	639—647 (Fe) 6,5 (Ho)	$p = 10{,}5$ $\mu_{Fe^{3+}}$ (43 К) $= 4{,}6\,\mu_B$ $\mu_{Ho^{3+}}$ (1,25 К) $= 7{,}25\,\mu_B$ $\sigma_м = 0{,}24$ А·м²/моль	[3, 17]
$ErFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_п$ $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$ $T_п = 80 \div 100$ К	636—643 (Fe) 3,9—4,5 (Er)	$p = 9{,}5$ $\mu_{Fe^{3+}}$ (43 К) $= 4{,}6\,\mu_B$ $\mu_{Er^{3+}}$ (1,25 К) $= 5{,}8\,\mu_B$ $\sigma_м = 0{,}23$ А·м²/моль	[3, 17]
$TmFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_п$ $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$ $T_п = 80 \div 92$ К	630—632	$p = 7{,}3$ $\sigma_м = 0{,}32$ А·м²/моль	[3, 17]
$YbFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$, $T_п = 6 \div 8$ К	627—634	$p = 4{,}5$ $\sigma_м = 0{,}35$ А·м²/моль	[3, 17]
$LuFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [a]$	622—625	$\sigma_м = 0{,}28$ А·м²/моль	[3, 17]
$BiFeO_3$	Тригональная D_{3d}^6, C_{3v}^{6*2}	—	643	—	[17]
$KFeF_3$	Кубическая O_h^1 (тригональные искажения при $T < T_N$)	G-тип МП $\mu \parallel [111]$ $(2a, 2a, 2a)$	113	$\mu_{Fe^{2+}}$ (4,2 К) $= 4{,}42\mu_B$	[3, 17]

[*1] При низких температурах ($T < T_п$) в $DyFeO_3$ наблюдается ряд фазовых переходов, индуцируемых магнитным полем. Магнитные свойства $DyFeO_3$ соответствуют модели Изинга.

[*2] Предполагаемые структуры.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$RbFeF_3$	Кубическая [*1] O_h^1	G-тип МП $\mu \parallel C$ (2a, 2a, 2a)	102—105	$\theta = -88$ К, $p = 5{,}82$ $\mu_{Fe^{2+}} = 4{,}6\mu_B$	[3, 17]
$RbFeCl_3$	Гексагональная D_{6h}^4	НКС	2,5	При $T = 2{,}35$ К и $T = 1{,}95$ К магнитные фазовые переходы с изменением структуры	[77]
$CsFeF_3$	Гексагональная D_{6h}^4	$\alpha(\mu, C) = 75°$	60—62	$\mu_{Fe^{2+}}$ (77 К) $= 4{,}4\mu_B$	[3]
$KFeCl_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\mu \parallel C$ ФВ в (001) АФВ между (001)	15	$\mu_{Fe^{2+}}$ (77 К) $= 4{,}1\mu_B$	[3]
$TlFeI_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$ ФВ в (100) АФВ между (100)	21,5	$\theta = -44$ К, $p = 6{,}7$	[68]
$FePO_4$	Тригональная D_{3d}^4	$\mu \parallel C$	25	$\theta = -60$ К	[17]
$FeSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{17}	КС, $\mu \parallel [b]$ ФВ в (010) АФВ между (010)	21—23	$\theta = -30{,}5$ К, $p = 5{,}2$ $\chi_м(T_N)/4\pi =$ $= 78{,}5 \cdot 10^{-3}$ см³/моль $\mu_{Fe^{2+}}$ (4,2 К) $= 4{,}1\mu_B$	[3, 17]
$FeNbO_4$	Моноклинная C_{2h}^4	$\mu \parallel$ (010) ФВ в (100) АФВ между (100) (2a, b, c)	—	—	[3]
$FeTaO_4$	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel C$	180	$\theta = -456$ К, $p = 5{,}3$ Ферримагнетик при $T < 30$ К $\mu_{Fe^{3+}}$ (77 К) $= 2{,}96\mu_B$	[3]
$FeWO_4$	Моноклинная C_{2h}^4	$\mu \parallel$ (010), $\alpha(\mu, [a]) = 29°$ ФВ в (100) АФВ между (100) (2a, b, c)	76	$\theta = 27$ К, $p = 5{,}41$ μ_{Fe} (4,2 К) $= 2{,}19\,\mu_B$	[3]
$FeUO_4$	Орторомбическая D_{2h}^4	КС[*2], $\mu \parallel [b]$	55	$p = 5{,}42$ При $T < 42$ К ферромагнетик со слабым антиферромагнетизмом, $\rho =$ $= 3{,}2 \cdot 10^7$ Ом·см	[3, 17]
$KFeF_4$	Орторомбическая D_{2h}^{17}	$\mu \parallel [c]$	137	—	[3]

[*1] При $T > T_N$ — кубическая структура; при 87 К $< T < T_N$ — тетрагональные искажения; при $T = 40 \div 87$ К — орторомбическая структура и при $T < 40$ К — моноклинная.

[*2] Для АФ-структуры.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$BaFeF_4$	Орторомбическая C_{2v}^{12}	$\mu \parallel [c]$ (a, $2b$, $2c$)	54	Магнитные свойства описываются двумерной моделью $\mu_{Fe^{2+}}$ (4,2 К) = 4,1 μ_B	[3, 17]
$RbFeF_4$	Орторомбическая C_{2h}^{5}	$\mu \parallel [b]$ ФВ в (111) АФВ между (111) (a, $2b$, c)	—	—	[3]
$FeAl_2O_4$	Кубическая O_h^7	—	8	$\theta = -76$ К, $p = 4,14$	[3]
$FeSb_2O_4$	Тетрагональная D_{4h}^{13}	НКС $\mu \perp [a]$	46	$\mu_{Fe^{2+}}$ (4,2 К) = 3,8 μ_B	[3, 17]
Rb_2FeF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel [b]$ ($2a$, $2a$, c)	50—56	$\lvert T_N / \theta \rvert = 0,54$ Магнитные свойства соответствуют XY-модели $H_A / H_E = 0,1$	[3, 6]
$FeCr_2Se_4$	Моноклинная C_{2h}^{3}	$\alpha(\mu, [10\bar{1}]) = 55°$ ФВ в $(10\bar{1})$ АФВ между $(10\bar{1})$ ($2a$, b, $2c$)	4,2	—	[3]
$FeNb_2O_6$	Орторомбическая D_{2h}^{14}	КС $\mu \parallel [a]$ (a, $2b$, c)	< 25	μ_{Fe} (4,2 К) = 3,87 μ_B	[3]
$FeTa_2O_6$	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel$ (001) $\alpha(\mu, [a]) = 45°$ ($2a$, $2b$, $2c$)	14	$\mu_{Fe} = 4,08 \mu_B$	[3]
Ba_2FeF_6	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$ ($2a$, $2a$, c)	48	Магнитные свойства соответствуют $2d$-модели $\mu_{Fe^{2+}}$ (4,2 К) = 3,46 μ_B	[78]
$FeNb_3S_6$	Гексагональная D_6^6	$\mu \parallel C$	—	$\theta = -100$ К, $p = 4,93$ μ_{Fe} (4,2 К) = 3,8 μ_B	[3]
Fe_2SiO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$[*1] КС при $T > T_п = 20$ К НКС при $T < T_п$	65	$\theta = -150$ К, $p = 6,03$ $\mu_{Fe\ I} = \mu_{Fe\ II}$ (4,2 К) = 4 μ_B	[3, 17]
Fe_2TiO_4	Кубическая O_h^7 (тетрагональные искажения при $T < T_N$)	—	140—142	$\sigma \neq 0$ μ_{Fe} (4,2 К) = 4,2 μ_B	[3]

[*1] $\mu_{Fe\ I} \parallel [b]$, $\mu_{Fe\ II}$ образуют скошенную АФ-структуру при $T < T_N$ [116].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$CaFe_2O_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\mu \parallel [c]$	180—200	$\theta = -580$ К, $p = 5{,}4$ $\mu_{Fe^{3+}}$ (4,2 К) $= 4{,}0\mu_B$	[3]
$ZnFe_2O_4$	Кубическая O_h^7	НКС (a, a, $2a$)	9—17	$\theta = -21$ К $\mu_{Fe^{3+}}$ (4,2 К) $= 4{,}0\mu_B$	[3, 17]
$BaFe_2O_4$	Орторомбическая C_{3v}^9	G_z-тип МП	880	$\mu_{Fe} = 4.58\mu_B$	[3]
Fe_2Mn_4P	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС $\mu \parallel (101)$ (a, b, 2 c)	340	$\theta = -81$ К	[3]
Fe_2GeS_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС (изменение структуры при $T = 69$ К)	108	$\mu_{Fe\,I}$ (4,2 К) $= 3{,}98\,\mu_B$ $\mu_{Fe\,II}$ (4,2 К) $= 3{,}60\,\mu_B$	[3]
Fe_2TeO_6	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel C$	201—218	Магнитоэлектрик $\mu_{Fe^{3+}}$ (4,2 К) $= 4{,}19\,\mu_B$	[3, 17]
$Ca_2Fe_2O_5$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [c]$ $c < a < b$	720—730	$\theta = -615$ К $\mu_{Fe^{3+}}$ (4,2 К) $= 4{,}5\,\mu_B$	[3, 17]
$Sr_2Fe_2O_5$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\mu \parallel [c]$	600—700	$\mu_{Fe^{3+}}$ (77 К) $= 4{,}5\mu_B$	[3, 17]
$Fe_2Mo_3O_8$	Гексагональная C_{6v}^4	$\mu \parallel C$	59,5	$\theta_\perp < -200$ К, $\theta_\parallel = -75$ К $p_\perp = 4{,}4$, $p_\parallel = 5{,}8$	[79]
$Na_3Fe_5O_9$	Моноклинная C_{2h}^6	$\mu \perp [001]$	375—381	$\mu_0 H_{эф} = 51{,}0$ Тл*1	[3, 17]
α-FeOOH	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\mu \parallel [b]$	330—403	$p = 6{,}4$, $\mu_{Fe^{3+}}$ (77 К) $=$ $= 5\mu_B$	[3, 17]
β-FeOOH	Тетрагональная C_{4h}^5	$\mu \parallel C$	273—285	$\theta = -640$ К, $\mu_{Fe^{3+}}$ (77 К) $=$ $= 5\,\mu_B$	[3]
γ-FeOOH	Орторомбическая D_{2h}^{17}	КС, ФВ в (001) АФВ между (001)	50—75	$p = 4{,}9$	[3]
δ-FeOOH	Тригональная D_{3d}^4	$\mu \perp C$	450—460	$\mu_{Fe\,I} = \mu_{Fe\,II}$ (77 К) $=$ $= 5\,\mu_B$	[3]

*1 Эффективное поле сверхтонкого взаимодействия, усредненное по трем неэквивалентным позициям ионов Fe^{3+}.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$LiFePO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	53	$\mu_0 H_E = 43{,}0$ Тл	[17]
$FeTiNdO_5$	Орторомбическая D_{2h}^{9}	НКС (a, b, $2c$)	—	—	[3]
$FeCrWO_6$	Тетрагоиальная D_{4h}^{14}	КС, $\mu \parallel C$	—	—	[3]
Ca_2FeAlO_5	Орторомбическая D_{2h}^{28}	$\mu \parallel [a]$	60	—	[17]
$FeCl_2 \cdot 2H_2O$	Моноклиииая C_{2h}^{3}	$\mu \parallel (101)$ $\alpha(\mu, [a]) = 58°$	23	Метамагнетик $\mu_0 H_{c_1} = 3{,}92$ Тл $\mu_0 H_{c_2} = 4{,}56$ Тл	[17]
$FeCl_2 \cdot 4H_2O$	Моиоклинная	$\mu \parallel [b]$	1	$\chi_м(T_N)/4\pi = 0{,}105$ см³/моль	[17]
$K_3Fe(CN)_6$	Моиоклиииая C_{2h}^{5}	—	0,129	—	[17]
$FeSO_4 \cdot H_2O$	Моноклинная C_{2h}^{6}	КС, $\mu \parallel [c]$	—	—	[3]
$FeC_2O_4 \cdot 2H_2O$	—	—	20	—	[17]
$Cs_2FeF_5 \cdot 2H_2O$	Орторомбическая D_{2h}^{7}	$\mu \parallel [a]$	2,4	Анизотропия типа ЛО	[80]
$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	Моноклинная C_{2h}^{5}	НКС, $\sigma \parallel [b]$	15—20	$\sigma_м = 4{,}46$ А·м²/моль $\mu_{Fe^{2+}}(4{,}2\ К) = 0{,}82\mu_B$	[3, 17]
$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$	Моноклинная C_{2h}^{3}	$\mu \parallel (101)$	8—12	$\mu_{Fe} = 4\mu_B$	[3, 17]
$Fe(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклиниая C_{2h}^{5}	$\sigma \parallel [b]$	3,7	$\sigma \neq 0$ $\mu_{Fe\,I}(1{,}5\ К) = 3{,}7\mu_B$ Магнитные моменты Fe II упорядочиваются при $T_{N_2} = 0{,}4$ К	[3, 17]
$Fe(NH_4) \cdot (SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	—	—	0,043	$\chi_м(T_N)/4\pi = 1{,}0$ см³/моль	[17]
[{$Fe(C_{13}H_{17}N_3)_2$} · $SO_4 \cdot 6H_2O$] (органометаллический полимер)	—	—	>300	В малых магнитных полях переходит в ферромагнитную фазу ($\mu_0 H < 6 \cdot 10^{-2}$ Тл)	81
CoO	Кубическая O_h^5 (тетрагональные искажения при $T < T_N$)	$\alpha(\mu, [001]) = 27{,}4°$ ($2a$, $2a$, $2a$)	291—292	$\theta = -280$ К, $p = 4{,}96$ $\chi_м(T_N)/4\pi = 5{,}3 \times 10^{-3}$ см³/моль $\mu_{Co^{2+}}(77\ К) = 3{,}52\mu_B$	[3, 17]

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
CoS	Гексагональная D_{6h}^4	—	358	$\theta = -632$ К, $p = 1{,}7$	[17]
CoF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel [001]$	37,7	$\theta = -52{,}7$ К $^{59}\nu_{Co}$ (0 К) = 180 МГц*1 λ_1 (0) = 351 мкм*2 λ_2 (0) = 278 мкм $\mu_0 H_{c\perp} = 12{,}0$ Тл*3 $\mu_{Co^{2+}}$ (23 К) = $3\mu_B$	[3, 17]
$CoCl_2$	Тригональная D_{3d}^5	ФВ в (111) АФВ между (111) (2a, 2a, 2a)	25	$\theta = 20$ К $\mu_{Co^{2+}}$ (4,2 К) = $3{,}15\mu_B$ Магнитные свойства при $T > T_N$ соответствуют модели двумерного антиферромагнетика	[3, 17]
$CoBr_2$	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel$ (001) (a, a, 2a)	19	μ_{Co} (4,2 К) = $2{,}86\mu_B$ Магнитные свойства при $T > T_N$ соответствуют модели двумерного антиферромагнетика	[3, 17]
α-CoI_2	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \nparallel C$	3	—	[17]
$CoSe_2$	Кубическая T_h^6	(a, a, 2a)	93	$\theta = -160$ К, $p = 2{,}2$ μ_{Co} (4,2 К) = $1\mu_B$ Полупроводник	[3, 17]
CoF_3	Тригональная D_{3d}^6	КС, $\mu \parallel [111]$	460	μ_{Co} (4,2 К) = $4{,}4\mu_B$	[3, 17]
Co_3O_4	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel [001]$	40	$\theta = -53$ К, $p = 4{,}14$ $\mu_{Co^{2+}}$ (4,2 К) = $3{,}25\mu_B$	[3, 17]
$CoCO_3$	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \perp C$*4 $\sigma \perp C$	18,1	$\theta = -52$ К, $p = 4{,}34$ Анизотропия типа ЛП $\sigma_\perp$ (0 К) = 1,4 А·м²/моль $\mu_0 H_D = 2{,}7 \div 5{,}1$ Тл*5	[2, 3, 86]

*1 Центральная частота квадрупольно-расщепленного спектра, состоящего из семи линий ($I = 7/2$) [82].
*2 При H ∥ [001] g-факторы для λ_1 (H) и λ_2 (H) соответственно равны $g_1 = 1{,}18$ и $g_2 = 2{,}80$.
*3 В интервале $H_{c\parallel,1} < H < Hc_{\parallel,2}$ ($\mu_0 H_{c\parallel,1} = 21$ Тл, $\mu_0 H_{c\parallel,2} = 25{,}5$ Тл) реализуется угловая фаза, в которой моменты подрешеток отклонены от оси C_4 на разные углы [83].
*4 $\sigma_\perp \gg \sigma_\parallel = 7 \cdot 10^{-3}$ А · м²/моль [84].
*5 Сводку значений H_D, измеренных различными авторами, см. в [85].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$CoTiO_3$	Тригональная C_{3i}^2	$\mu \parallel (111)$ $(2a, 2a, 2a)$	37—42	$\theta = -9{,}3$ К, $p = 5{,}46$	[3, 17]
$CoGeO_3$	Моноклинная C_{2h}^6	—	8,5	$\theta = -14$ К, $p = 5{,}33$	[17]
$NaCoF_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\mu \parallel [b]$	74—78	$\mu_{Co^{2+}}$ (4,2 К) $= 3{,}4\mu_B$	[3]
$KCoF_3$	Кубическая O_h^1 (тетрагональные искажения при $T<78$ К)	G-тип МП $(2a, 2a, 2a)$	135—144	$\theta = -125$ К $^{59}\nu_{Co} = 372{,}7$ МГц*1 $\mu_{Co^{2+}}$ (4,2 К) $= 3{,}3\mu_B$	[3, 17]
$RbCoF_3$	Кубическая O_h^1 (тетрагональные искажения при $T < 101$ К, $c/a = 0{,}997$ при $T = 4{,}2$ К)	G-тип МП $(2a, 2a, 2a)$	98	$\theta = -180$ К, $p = 5{,}53$ μ_{Co} (4,2 К) $= 3\mu_B$	[3, 6, 17]
$CsCoF_3$	Тригональная D_{3d}^5	—	8	$\theta = -62$ К	[6]
$RbCoCl_3$	Гексагональная D_{6h}^4	—	18	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 1$	[6]
$CsCoCl_3$	Гексагональная D_{6h}^4	КС при $T > 9{,}2$ К	21	$\theta = -100$ К Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 1$; $\lvert J'/J \rvert = 1{,}6 \cdot 10^{-2}$ Ферримагнетик при $T < 9{,}2$ К	[6]
$RbCoBr_3$	Гексагональная D_{6h}^4	КС, $\mu \parallel C$ $(\sqrt{3}a, \sqrt{3}a, c)$	36	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 1$ μ_{Co} (4,4 К) $= 3{,}4\mu_B$	[3, 6, 17]
$CsCoBr_3$	Гексагональная D_{6h}^4	КС при $T > 15$ К $\mu \parallel C$	28	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 1$ Ферримагнетик при $T < 15$ К	[6]
α-$CoSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{17}	НКС	12—15	$\theta = -47$ К, $p = 5{,}65$ $\mu_{Co^{2+}}$ (4,2 К) $= 3{,}3\mu_B$	[3]

*1 Значение центральной частоты квадрупольно-расщепленного спектра, состоящего из семи линий со средним интервалом между линиями $\Delta\nu = 2{,}1$ МГц [87].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
β-$CoSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС	12—15	$\theta = -24$ К, $p = 5{,}65$ $\chi_м(T_N)/4\pi = 62 \times$ $\times 10^{-3}$ см^3/моль $\mu_0 H_{c,[a]} = 1{,}2$ Тл μ_{Co} (4,2 К) $= 3{,}8\mu_B$	[3, 17]
$CoSeO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС	30	$p = 3{,}64$	[3]
$CoWO_4$	Моноклинная C_{2h}^4	$\mu \parallel (010)$ ФВ в (100) АФВ между (100) $(2a, b, c)$	55	$\theta/T_N = -1{,}55$	[3]
$CoUO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{28}	НКС, $\mu \parallel [a]$ и $\mu \parallel [c]$ $(2a, b, 2c)$	12	$\theta = -23$ К $\chi_м(T_N)/4\pi = 83 \times$ $\times 10^{-3}$ см^3/моль μ_{Co} (4,2 К) $= 4{,}06\mu_B$	[3, 17]
$BaCoF_4$	Орторомбическая C_{2v}^{12}	$\mu \parallel [a]$	70	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$ $\mu_{Co^{2+}}$ (4,7 К) $= 3{,}4\mu_B$	[3]
$CoRh_2O_4$	Тетрагональная	—	27	$\theta = -30$ К	[17]
K_2CoF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$ $(2a, 2a, c)$	107—125	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$; $\lvert J'/J \rvert \approx 10^{-6}$ $H_A/H_E = 0{,}7$	[3, 17, 88]
Rb_2CoF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	101	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$; $\lvert J'/J \rvert \approx$ $\approx 10^{-6}$ $H_A/H_E = 0{,}8$	[88]
$CoNb_2O_6$	Орторомбическая D_{2h}^{14}	$\mu \parallel [a]$ $(a, b, 2c)$	—	—	[3]
$CoCs_3Cl_5$	Тетрагональная	—	0,52	—	[17]
$CoCs_3Br_5$	Тетрагональная	—	—	—	[17]
Co_2SiO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС C_y-тип МП	49	$\theta = -65$ К, $p = 5{,}09$ $\mu_{Co^{2+}}$ (4,2 К) $= 3{,}3\mu_B$	[3, 17]
$GeCo_2O_4$	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel (111)$ $(2a, 2a, 2a)$	20	$\theta = -90$ К, $p = 4{,}7$ $\mu_{Co^{3+}}$ (4,2 К) $= 3{,}2\mu_B$	[3]

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$Co_2Mo_3O_8$	Гексагональная C_{6v}^4	$\mu \parallel C$	40,8	$\theta_\perp = -185$ К, $p_\perp = 5{,}9$ $\theta_\parallel = -95$ К, $p_\parallel = 5{,}8$	[79]
$Co_3B_2O_6$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	КС, $\mu \parallel [c]$ $(a, 2b, 2c)$	30—37	$\theta = -63$ К, $p = 5{,}29$	[3]
$Nb_2Co_4O_9$	Тригональная D_{3d}^4	КС, $\mu \parallel C$	30	$\theta = -10$ К, $p = 4$ $\mu_{Co^{2+}}(4{,}2\text{ К}) = 3\mu_B$	[3, 17]
$Ta_2Co_4O_9$	Тригональная D_{3d}^4	—	206*1	—	[17]
$LiCoPO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС A_y-тип МП	23	$\theta = -90$ К, $p = 5{,}7$ $\mu_0 H_E = 32$ Тл	[3, 17]
NH_4CoF_3	Кубическая O_h^1 (тетрагональные искажения при $T<T_N$)	G-тип МП	124	$\sigma \neq 0$ при $T < T_N$	[89]
Na_2CoSiO_4	Орторомбическая C_{2h}^5	$\mu \perp [b]$ $(2a, b, 2c)$	4	$\mu_{Co}(1{,}2\text{ К}) = 2{,}7\mu_B$	[3]
Na_2CoGeO_4	Орторомбическая C_{2h}^5	$\alpha(\mu, [b]) = 80°$ $(2a, b, c)$	4	$\mu_{Co}(1{,}2\text{ К}) = 3{,}0\mu_B$	[3]
$BaCoWO_6$	Кубическая O_h^5	$\alpha(\mu, [111]) = 20°$	—	—	[17]
Ba_2CoWO_4	Кубическая O_h^5	II тип МП $\alpha(\mu, [111]) = 23°$ $(2a, 2a, 2a)$	17	$\mu_{Co}(4{,}2\text{ К}) = 2{,}0\mu_B$	[3]
Ba_2CoUO_4	Кубическая O_h^5	ФВ в (001) АФВ между (001)	9	$\mu_{Co} = 1{,}35\mu_B$	[3]
$CoCl_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^3	$\mu \parallel [b]$	18	Метамагнетик $\mu_0 H_{c_1, [b]} = 3{,}2$ Тл $(\Delta m = 1\mu_B)$ $\mu_0 H_{c_2, [b]} = 4{,}6$ Тл $(\Delta m = 3\mu_B)$ $\chi_M(T_N)/4\pi = 21 \times 10^{-2}$ см³/моль	[3, 17]
$CoBr_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^3	$\mu \parallel [b]$	9,5	$\theta = 0$ К Метамагнетик $\mu_0 H_{c_1, [b]} = 1{,}37$ Тл $\mu_0 H_{c_2, [b]} = 2{,}98$ Тл	[17]

*1 Из измерений магнитоэлектрического эффекта.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	Моноклинная C_{2h}^3	$\mu \parallel [c]$ (a, b, $2c$)	2,3	$\theta = -20$ К $\chi_м(T_N)/4\pi = 17{,}8 \times$ $\times 10^{-2}$ см³/моль $\mu_{Co^{2+}}$ (1,5 К) $= 3{,}8\mu_B$	[3, 17]
$CoBr_2 \cdot 6H_2O$	Моноклинная C_{2h}^3	—	3,2	—	[17]
$Co(NC_5H_5)Cl_2$	Моноклинная	—	8,7	$\theta = -4$ К, $\chi_м(T_N)/4\pi = 2{,}8$ см³/моль	[17]
$Co(H_2O)_6 \cdot SiF_6$	Тригональная	$\sigma \perp C$	0,15	$\sigma = 3{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot 2M_0$*1	[17]
$CoCl_2[(NH_2)_2 \cdot CS]_4$	Тетрагональная C_{4h}^4	—	0,92*2	—	[17]
$CoK_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	—	—	0,193	—	[17]
$Co(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel$ (100)	5,1	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$	[17]
$Co(NH_4)_2 \cdot (SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	Моноклинная	—	0,084	$\sigma \approx 7{,}1$ А · м²/моль	[17]
$[Co(\gamma\text{-}CH_3 \cdot C_5H_4NO)_6] \cdot (ClO_4)_2$	Моноклинная	—	0,49	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 2$	[90]
NiO	Кубическая O_h^5 (ромбоэдрические искажения ниже T_N)	$\mu \parallel$ (111) II тип МП	523	$\theta = -2470$ К, $p = 4{,}6$ λ (0) = 274 мкм	[3, 17]
NiS	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel C$ ФВ в (001) АФВ между (001)	263—265*3	μ_{Ni} (4,2 К) $= 1{,}8\mu_B$	[3, 17]
NiAs	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \perp C$	150	$\theta = -300$ К	[17]
NiF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	НКС $\sigma \parallel$ [010]	73	$\theta = -100$ К $\sigma = 0{,}35$ А · м²/моль λ_1 (0) = 3000 мкм λ_2 (0) = 320 мкм $\mu_{Ni^{2+}}$ (23 К) $= 2\mu_B$	[2, 3]

*1 $2M_0 = Nng\mu_B s$, где N — число Авогадро, n — число магнитных ионов в молекуле, g — фактор Ланде, s — спин магнитного иона.

*2 Из измерений теплоемкости.

*3 Переход П → АФ обладает свойствами, характерными для перехода первого рода; в точке перехода изменяются параметры кристаллической ячейки: $\Delta a/a = 3 \cdot 10^{-3}$; $\Delta c/c = 10^{-2}$.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$NiCl_2$	Тригональная D_{3d}^5	$\mu \perp C$	52	$\theta = 67$ К	[17]
$NiBr_2$	Тригональная D_{3d}^5	—	60	$\theta = -20$ К, $p = 3{,}0$	[17]
$NiCO_3$	Тригональная D_{3d}^6	НКС $\sigma \perp C$ $\alpha(\mu, [111]) = 63°$	25	$\sigma_м$ (4,2 К) = 2,08 А·м²/моль $\mu_0 H_D = 9{,}0$ Тл $\mu_0 H_E = 24{,}0$ Тл	[3, 17, 84]
$NiTiO_3$	Тригональная C_{3i}^2	$\mu \perp [111]$ ФВ в (111) АФВ между (111) $(a, a, 2a)$	23	$\theta = -11$ К, $p = 3{,}2$ $\lambda(0) = 1{,}6$ мм μ_{Ni} (4,2 К) $= 2{,}2\mu_B$	[3, 17]
$NaNiF_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС $\mu \parallel (010)$ $\sigma \parallel [c]$	138—156	$\theta = -280$ К $\sigma_м = 0{,}335$ А·м²/моль $\mu_0 H_D = 16{,}2$ Тл $\mu_0 H_A = 1{,}2$ Тл $\mu_0 H_E = 200$ Тл*1 μ_{Ni} (4,2 К) $= 2\mu_B$	[3, 17]
$KNiF_3$	Кубическая O_h^1	G-тип МП $\mu \parallel [001]$ $(2a, 2a, 2a)$	275	$\theta = -234$ К $\chi_м(T_N)/4\pi = 2{,}05 \times$ $\times 10^{-3}$ см³/моль $\mu_{Ni^{2+}}$ (4,2 К) $= 2{,}2\mu_B$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 3$ $\mu_0 H_E = 3{,}6 \cdot 10^2$ Тл $\mu_0 H_A = 2{,}7 \cdot 10^{-2}$ Тл	[3, 6, 17, 66]
$CsNiF_3$	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \perp C$	2,61	Магнитные свойства соответствуют XY-модели, $d = 1$	[6]
$RbNiCl_3$	Гексагональная D_{6h}^4	ГС	11	$\theta = -101$ К $\mu_{Ni^{2+}}$ (4,2 К) $= 1{,}5\mu_B$ $\lvert J'/J \rvert = 2 \cdot 10^{-2}$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$	[3, 6, 17]
$CsNiCl_3$	Гексагональная D_{6h}^4	ГС при $T > T_п = 4{,}4$ К $\mu \parallel (010)$ при $T < T_п$	4,85	$\theta = -69$ К, $p = 3{,}41$ $\chi_\parallel$ (0 К)$/4\pi = 3{,}5 \times$ $\times 10^{-3}$ см³/моль $\chi_\perp$ (0 К)$/4\pi = 7{,}3 \times$ $\times 10^{-3}$ см³/моль $\mu_{Ni^{2+}}$ (1,6 К) $= 1\mu_B$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d=1$; $\lvert J'/J \rvert = 6 \cdot 10^{-2}$	[3, 6, 17, 119]

*1 Значения эффективных полей получены из экспериментов по АФМР в предположении анизотропного эффективного g-фактора подрешеток: $g_{xx} \approx g_{zz} = 2{,}14$; $g_{xz} = g_{zx} = -2{,}5 \cdot 10^{-3}$ (x, y, z направлены соответственно вдоль осей [a], [b], [c]).

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$TlNiCl_3$	Гексагональная D_{6h}^4	НКС	13	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$; $\lvert J'/J \rvert = 2 \cdot 10^{-2}$	[6]
$NiSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{17}	КС, $\mu \parallel [b]$ ФВ в (010) АФВ между (010)	37	$\theta = -82$ К, $p = 3{,}82$ $\chi_м(T_N)/4\pi = 15 \times$ $\times 10^{-3}$ см^3/моль μ (4,2 К) $= 2{,}1\mu_B$	[3, 17]
$NiCrO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{17}	КС A_x-тип МП	23	$\theta = -105$ К $\mu_{Ni^{2+}}$ (4,2 К) $= 1{,}28\mu_B$	[3]
$NiSeO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{17}	$\mu \perp [c]$ A_{xy}-тип МП	27	$p = 2{,}14$	[3]
$BaNiF_4$	Орторомбическая C_{2v}^{12}	КС, $\mu \parallel [b]$ (a, $2b$, $2c$)	150	μ_{Ni} (4,2 К) $= 1{,}96\mu_B$	[3, 17]
$Ni(OH)_2$	Тригональная D_{3d}^3	КС, $\mu \parallel C$	28—35	$p = 3{,}2$ μ_{Ni} (78 К) $= 2{,}0\mu_B$	[3]
K_2NiF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$	97	$\theta = -600$ К $\mu_0 H_{c\parallel}$ (4,2 К) $= 18{,}0$ Тл $H_A / H_E = 2 \cdot 10^{-3}$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$; $\lvert J'/J \rvert \approx$ $\approx 10^{-6}$	[6, 17]
Rb_2NiF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$	91	$\lvert T_N/\theta \rvert = 0{,}41$ $\mu_0 H_{c\parallel}$ (4,2 К) $= 35{,}0$ Тл $H_A / H_E = 10^{-2}$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$; $\lvert J'/J \rvert =$ $= 10^{-6}$	[6, 17]
$NiRh_2O_4$	Тетрагональная	—	18	$\theta = -20$ К	[17]
Tl_2NiF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	101	$T_N/\theta = -0{,}42$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$; $\lvert J'/J \rvert =$ $= 10^{-6}$	[6, 17]
$NiSiO_4$	Орторомбическая	—	8,2	$\theta = 14$ К	[17]
Ba_2NiF_6	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$ ($2a$, $2a$, c)	93	$\mu_{Ni^{2+}}$ (4,2 К) $= 1{,}9\mu_B$ Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$	[78]

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$GeNi_2O_4$	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel (111)$ $(2a, 2a, 2a)$	15—16	$\theta = -6$ К, $p = 3{,}24$ $\mu_{Ni^{3+}}(4{,}2\ К) = 2{,}2\mu_B$	[3, 17]
$Ni_3B_2O_6$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	НКС $(a, 2b, 2c)$	49	$\theta = -5$ К, $p = 3{,}07$	[3]
$LiNiPO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС A_z-тип МП	23	$\theta = -79$ К, $p = 3{,}35$	[3]
$SrNiMoO_6$	—	—	71,5	—	[17]
NH_4NiCl_3	Гексагональная D_{6h}^4	НКС	9	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$	[6]
Na_2NiAlF_3	Орторомбическая C_{2v}^{20}	НКС $\sigma \parallel [b]$ при $T < 11$ К	90	Слабый ферромагнетик при $T < 11$ К	[3]
Ba_2NiWO_6	Кубическая O_h^5	$\mu \perp [111]$ II тип МП $(2a, 2a, 2a)$	17	$\mu_{Ni}(4{,}2\ К) = 1{,}9\mu_B$	[3, 17]
$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	Моноклинная C_{2h}^3	$\alpha(\mu, [a]) = 22°$ $(a, b, 2c)$	5,34—5,8	$\theta = -7$ К	[3, 17]
$NiBr_2 \cdot 6H_2O$	—	—	6,5*1	—	[17]
$Ni_3B_7O_{13}I$	—	—	120	—	[17]
$Ni(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная	$\mu \parallel [a]$	4,2	$\theta = -2{,}5$ К	[17]
$Ni(IO_3)_2 \cdot 2H_2O$	—	—	3,08	$\theta = -5$ К $\sigma_{уд}(0\ К) = 1{,}45$ А·м²/кг	[91]
$Ni(IO_3)_2 \cdot 2D_2O$	Орторомбическая D_{2h}^{15}	НКС	3,1	$\sigma \neq 0$ $\mu_{Ni} = 2\mu_B$	[3]
$Ni(NO_3)_2 \cdot 6NH_3$	Кубическая	—	1,35*1	$\theta = -3{,}3$ К	[17]
$Ni(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel (100)$	15,7*2	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$	[17]
$Ni(NH_3)_2 \cdot Ni(CN)_4 \cdot 2C_6H_6$	Тетрагональная C_{4h}^1	$\mu \parallel C$	2,37	$\mu_0 H_{c\parallel} = 3{,}5$ Тл $\mu_0 H_A(1{,}46\ К) = 2{,}2$ Тл	[17]

*1 Из измерений теплоемкости.

*2 При этой температуре упорядочиваются магнитные моменты только в плоскостях (100). Система моментов плоскостей (200) обусловливает парамагнитные свойства при температуре ниже T_N. При $T = 3{,}1$ К наблюдается аномалия Шоттки в поведении теплоемкости.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
CuO	Моноклинная C_{2h}^6		230	$\mu_{Cu} \leqslant 0{,}5\mu_B$	[17]
CuF_2	Моноклинная O_{2h}^5	НКС $\mu \parallel (a, b)$ $\sigma \parallel (010)$ $(2a, b, c)$	69—70	$\theta = -200$ К $\sigma_{уд} \leqslant 1$ А · м²/кг	[3, 17]
$CuCl_2$	Моноклинная C_{2h}^1	—	23,9	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$	[92]
$CuBr_2$	Моноклинная C_{2h}^1	—	74	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$; $\lvert J'/J \rvert = 7 \cdot 10^{-2}$	[92]
Cu_2S_6	Тетрагональная	—	373	$\theta = -1694$ К, $p = 43$	[17]
$KCuF_3$	Тетрагональная D_{4h}^{18} и D_{4h}^5 *1	$\mu \parallel (a, b)$ А-тип МП	38 — D_{4h}^{18} 22 — D_{4h}^5	$\mu_{Cu^{2+}}$ (4,2 К) $= 0{,}45\mu_B$ для D_{4h}^5 $\mu_{Cu^{2+}}$ (4,2 К) $= 0{,}54\mu_B$ для D_{4h}^{18}	[3, 17]
$CsCuCl_3$	Гексагональная D_6^2 или D_6^3	ГС, $\mathbf{k}_0 \parallel C$ $\mu \perp C$	10,7	$\mu_{Cu^{2+}}$ (4,2 К) $= 0{,}58\mu_B$	[93]
$CuSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [a]$	35	$\theta = -88$ К $\mu_{Cu^{2+}}$ (4,2 К) $= 0{,}83\mu_B$	[3, 17]
$CuSeO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС, $\mu \parallel [c]$ ФВ в (001) АФВ между (001)	34	$\mu_{Cu^{2+}}$ (7,2 К) $= 0{,}9\mu_B$	[3, 17]
$GdCuO_4$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	3—5	$\theta = -15$ К	[94]
$CuWO_4$	Моноклинная C_{2h}^4	—	90	$\theta/T_N = -1{,}89$	[3]
La_2CuO_4	Орторомбическая	$\mu \perp [b]$	240	$\mu = 1{,}1 \pm 0{,}3\mu_B$	[123]
$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	Орторомбическая D_{2h}^7	$\mu \parallel [a]$ $(a, b, 2c)$	4,3	$\theta = 5$ К $\mu_0 H_{c\parallel} = 0{,}65$ Тл	[2, 3]
$CuCl_2 \cdot 2D_2O$	Орторомбическая D_{4h}^7	$\mu \parallel [a]$	4,3	—	[17]

*1 Обе структуры наблюдались одновременно.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$Cu(C_2H_3O_2)_2$	—	—	270	—	[17]
YBa_2CuO_6	Тетрагональная	$\mu \parallel C$	500	$\mu = 0{,}48 \pm 0{,}05 \mu_B$	[124]
$CuSiO_3 \cdot 2H_2O$	—	—	21*1	—	[17]
$LiCuCl_3 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel (101)$	5—6	$\theta = -10$ К, $p = 1{,}8$ $\chi_M(T_N)/4\pi = 30 \times$ $\times 10^{-3}$ см^3/моль $\mu_0 H_{c\parallel} = 1{,}0$ Тл*2 $\mu_{Cu^{2+}}(4{,}2\ \text{К}) = 1\mu_B$	[3, 17]
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	Триклинная C_i^1	—	0,029*1	—	[17]
$CuSeO_4 \cdot 5H_2O$	—	—	0,046*1	—	[17]
$Cu(NO_3)_2 \cdot 2{,}5H_2O$	—	—	0,45	$\chi_M(T_N)/4\pi = 65 \times$ $\times 10^{-3}$ см^3/моль	[17]
$Cu_3(CO_3)_2 \cdot (OH)_2$	Моноклинная C_{2h}^5	—	1,86	$\theta = -10$ К	[17]
$Cu(HCO_2)_2 \cdot 4H_2O$	Моноклинная	—	17	$\theta = -175$ К, $\sigma_M(0\ \text{К}) =$ $= 0{,}15$ А·м^2/моль Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$	[17]
$CuK_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	—	—	0,05	—	[17]
$Cu(C_2H_3O_2)_2 \cdot H_2O$	—	—	250—280	—	[17]
$(C_6H_{11}NH_3) \cdot CuCl_3$	Орторомбическая D_2^4	$\mu \parallel (a, b)$ $\alpha(\mu, [b]) = 17°$	2,21	Магнитные свойства соответствуют модели ферромагнитных цепей $\lvert J'/J \rvert =$ $= 10^{-3}$	[95]
$(C_6H_{11}NH_3) \cdot CuBr_3$	Орторомбическая D_2^4	$\mu \parallel (a, b)$ $\alpha(\mu, [b]) = 25°$	1,5	Магнитные свойства соответствуют модели ферромагнитных цепей $\lvert J'/J \rvert = 10^{-3}$	[95]

*1 Из измерений теплоемкости.
*2 Поле опрокидывания подрешеток.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$(C_2H_5NH_3)_2 \cdot CuCl_4$	Орторомбическая D_{2h}^{15}	ФВ в (a, b) АФВ между (a, b)	—	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 2$ $\mu_0 H_{E_1} = 8 \cdot 10^{-2}$ Тл (между слоями) $\mu_0 H_{E_2} = 50{,}0$ Тл (внутри слоя) $\mu_0 H_{c\parallel} = 0{,}16$ Тл $\mu_0 H_D = 1{,}2 \cdot 10^{-2}$ Тл	[17, 96]
$Cu(NH_3)_4SO_4 \cdot H_2O$	—	—	0,37*1	$\theta = -1{,}2$ К	[17]
$Cu \cdot (C_6H_5COO)_2 \cdot 3H_2O$	Моноклинная	—	1,4	Магнитные свойства соответствуют модели Гейзенберга, $d = 1$	[17]
MoF_3	Кубическая O_h^1	—	185	—	[17]
AgF_2	Орторомбическая D_{2h}^{15}	$\mu \parallel (100)$ $\alpha(\mu, [c]) = 0{,}5°$ $\sigma \parallel [b]$	163	$p = 2$ $\mu_{Ag^{2+}}$ (4,2 К) $= 0{,}66\mu_B$	[3]
Ce	Гексагональная D_{6h}^4	Ферримагнитное упорядочение в плоскости, перпендикулярной C, и АФВ между плоскостями, перпендикулярными C	13	$\theta = -46$ К $\mu \approx 0{,}6\mu_B$	[12, 14]
CeS	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$ II тип МП	7	$\theta = -45$ К, $p = 2{,}57$ μ_{Ce} (4,2 К) $= 0{,}57\mu_B$	[3]
CeZn	Кубическая O_h^1	—	29—36	$\theta = -18 \div -2$ К, p=2,3	[13]
CeSb	Кубическая O_h^5 (тетрагональные искажения при $T < T_N$)	Изменение структуры при $T = 15{,}5$; 14,9; 13,5; 8,4 К	16—18	$p = 2{,}58$ μ_{Ce} (4,2 К) $= 2{,}1\mu_B$	[3, 17]
CeBi	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [001]$ I тип МП	25—26	$\theta = -12$ К, $p = 2{,}38$ μ_{Ce} (4,2 К) $= 2{,}0\mu_B$	[3,17]
CeC_2	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$ I тип МП	33	$\theta = 2{,}54$, μ_{Ce} (4,2 К) $= 1{,}74\mu_B$	[3]
$CeAl_2$	Кубическая O_h^7	Несоизмеримая СВ	3,9	$n_s = 0{,}71$*2	[97]
$CeZn_2$	Орторомбическая D_{2h}^{28}	$\mu \parallel [b]$	7,5	μ_{Ce} (4,2 К) $= 1{,}6\mu_B$	[3]
$CeCl_3$	Гексагональная	—	0,345	—	[17]

*1 Из измерений теплоемкости.
*2 Магнитные характеристики $CeAl_2$ см. в [58, с. 74—75], результаты измерения намагниченности в сильных магнитных полях представлены в [98].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
CeB_6	Кубическая (структура типа CaB_6)	НКС	2,3	μ_{Ce} (1,3 К) $= 0{,}7\mu_B$ Магнитные свойства соответствуют модели кондорешетки	[99]
$CeTiO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	G-тип МП (Ti) F-тип МП (Ce)	116	$\mu_{Ce^{3+}}$ (81 К) $= 0{,}4\mu_B$ $\mu_{Ti^{3+}}$ (81 К) $= 0{,}36\mu_B$ Металлическая проводимость при $T > 100$ К	[59]
$Ce_2Zn_3 \cdot (NO_3)_{12} \cdot 24H_2O$	Тригональная	—	0,0063	—	[17]
Pr	Гексагональная D_{6h}^4	—	23—35	Чистые монокристаллические образцы не имеют четкой магнитной структуры	[3]
PrAg	Кубическая O_h^1	C-тип МП ($2a$, $2b$, c)	11—14	$\mu_{Pr^{3+}}$ (4,2 К) $= 2{,}1\mu_B$	[3]
PrMg	Кубическая O_h^1	—	45—47	$\theta = -10$ К, $p = 3{,}4$	[13]
PrC_2	Тетрагональная D_{4h}^{17}	I тип МП $\mu \parallel C$	15	μ_{Pr} (4,2 К) $= 1{,}14\mu_B$	[3]
$PrCl_3$	Гексагональная	—	0,7	—	[17]
$PrSn_3$	Кубическая O_h^1	A-тип МП (a, a, $2a$)	8,6	$\theta = -8$ К	[3]
PrB_6	Кубическая	—	6,9*[1]	Металл ρ (300 К) $= 15 \cdot 10^{-7}$ Ом · м	[17]
$PrAlO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	—	$\theta = -100$ К	[17]
$PrCo_2Si_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$	31	μ_{Pr} (4,2 К) $= 3{,}19\mu_B$	[100]
Nd	Гексагональная	ФВ в плоскости, перпендикулярной C, и АФВ между плоскостями, перпендикулярными C (изменение структуры при $T = 7{,}5$ К)	19	$\theta = -16$ К μ_{Nd} (4,2 К) $= 2\mu_B$	[12, 14]
NdMg	Кубическая O_h^1	—	48—64	$\theta = -11$ К, $p = 3{,}7$	[13]
NdAl	Орторомбическая D_{2h}^{11}	НКС α (μ, [a]) $= 58°$ ($2a$, b, c)	29	$\theta = -4$ К μ_{Nd} (4,2 К) $= 2{,}7\mu_B$	[3]

*[1] Из измерений теплоемкости.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
NdP	Кубическая O_h^5	I тип МП $\mu \parallel [100]$	—	$\mu_{Nd^{3+}}$ (4,2 К) = 1,8μ_B	[3]
NdS	Кубическая O_h^5	НКС $\alpha(\mu, [111]) = 24°$	—	$\theta = -24$ К, $p = 3{,}62$	[3, 17]
NdAs	Кубическая O_h^5	I тип МП $\mu \parallel [100]$	—	$\mu_{Nd^{3+}}$ (4,2 К) = 2,13μ_B	[3]
NdSe	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel [111]$ $(2a, 2a, 2a)$	14	$\theta = -9$ К, $p = 3{,}5$ μ_{Nd} (4,2 К) = 1,57μ_B	[3, 17]
NdAg	Кубическая O_h^1	—	22	$\theta = -3$ К, $p = 3{,}6$	[13]
NdIn	Кубическая O_h^1	—	66—148	$\theta = 35$ К, $p = 3{,}3$	[13]
NdTe	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel [111]$ $(2a, 2a, 2a)$	13	$\theta = -14$ К, $p = 9{,}8$ μ_{Nd} (4,2 К) = 1,1μ_B	[3, 17]
NdSb	Кубическая O_h^5 (тетрагональные искажения при низких температурах)	—	10—16	$\theta = -3$ К, $p = 3{,}75$ $\mu_0 H_c = 10{,}5$ Тл $\mu_{Nd^{3+}}$ (4,2 К) = 2,99μ_B	[3, 17]
NdBi	Кубическая O_h^5	I тип МП $\mu \parallel [001]$	25	$\theta = -1$ К, $p = 3{,}58$	[3, 17]
NdC_2	Тетрагональная D_{4h}^{17}	I тип МП $\mu \parallel C$	29	μ_{Nd} (4,2 К) = 2,95μ_B	[3]
$NdCl_3$	Гексагональная	—	1,035	—	[17]
$NdIn_3$	Кубическая O_h^1	C-тип МП $(2a, 2a, a)$	7	$\theta = -17$ К, $p = 3{,}7$ $\mu_{Nd} = 2{,}1\mu_B$	[3, 13]
$NdSn_3$	Кубическия O_h^1	A-тип МП $(a, a, 2a)$	4,7	$\theta = -22$ К, $p = 3{,}6$ $\mu_{Nd} = 1{,}53\mu_B$	[3, 13]
$NdPb_3$	Кубическая O_h^1	—	2,7	$\theta = -23$ К, $p = 3{,}6$	[13]
$Nd(OH)_3$	Гексагональная C_{6h}^2	$\mu \parallel C$	1,7*1	—	[17]
$NdVO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	C_x-тип МП	132	$p = 3{,}32$	[3]

*1 $T_N = 0{,}265$ К [101].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$NdFe_2Si_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	КС	16	Слабый ферромагнетик при $T_N < T < T_C \approx 690$ К $\mu_{Nd} = 3{,}1\mu_B$	[3]
$NdRh_4B_4$	Тетрагональная (кристаллическая структура типа $CeCo_4B_4$)	—	1,31	$\theta = -6{,}2$, $p = 3{,}58$ Сверхпроводник при $T < 5{,}4$ К	[102]
Sm	Ромбоэдрическая	$\mu \parallel C$ (изменение структуры при $T = 14$ К)	106	$\mu_{Sm} = 0{,}1\mu_B$	[12, 14]
$SmCl_3$	Гексагональная	—	0,4	—	[17]
$SmRh_4B_4$	Тетрагональная (кристаллическая структура типа $CeCo_4B_4$)	—	0,87	$\theta = -1{,}93$ К, $p = 0{,}63$ Сверхпроводник при $T < 2{,}72$ К, $\mu_0 H_{c2}(0) = 0{,}185$ Тл	
Eu	Кубическая O_h^9	ГС $\mathbf{k}_0 \parallel [100]$	87—91	$p = 8$ $\mu_{Eu}(4{,}2\ \text{К}) = 5{,}9\mu_B$	[3, 12, 14]
EuSe	Кубическая O_h^5	НКС	4,6	Полупроводник, ферромагнетик при $T < 2{,}8$ К	[3, 17]
EuTe*[1]	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel [110]$ $(2a, 2a, 2a)$	8—11	$\theta = -7{,}5$ К $\mu_0 H_c = 7{,}5$ Тл $n_s = 7$	[17]
EuF_2	Кубическая O_h^5	—	2; 19,5*[2]	—	[17]
Eu_3O_4	Орторомбическая	—	5,3	$\mu_0 H_c = 0{,}2$ Тл	[17]
$EuTiO_3$	Кубическая	—	5,2	$\mu_0 H_c = 1{,}4$ Тл $n_s = 6{,}93$	[17]
$EuGd_2O_4$	Орторомбическая	—	4,5	—	[17]
GdP	Кубическая	—	15	$\theta = -2$ К $\mu_0 H_c = 7{,}5$ Тл	[17]
GdS	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel (111)$ $(2a, 2a, 2a)$	50	—	[3, 17]
GdCu	Кубическая O_h^1	—	41—140	$\theta = -75 \div -26$ К, $p = 8{,}4$	[13, 17]

*[1] Магнитные свойства образцов EuTe коррелируют с удельным электрическим сопротивленнем, которое может изменяться в широких пределах ($10^6 - 10^{-4}$ Ом·м при $T = 300$ К).
*[2] Из измерений АФМР на образцах, содержащих примеси [104].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
GdAs	Кубическая (тригональные искажения при $T < T_N$)	—	19—25	$\theta = -12$ К, $p = 8{,}2$ $\mu_0 H_c = 18{,}0$ Тл $n_s = 7{,}2$	[17]
GdSe	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel (111)$ $(2a, 2a, 2a)$	60	—	[3, 17]
GdAg	Кубическая O_h^1	—	138—150	$\theta = -84 \div -70$ К, $p = 8{,}2 \div 8{,}8$ $\chi_м (T_N)/4\pi = 40 \cdot 10^{-3}$ см³/моль	[13, 17]
GdIn	Тетрагональная	—	28	$\theta = -66 \div -18$ К, $p = 8{,}1$ $\chi_м (T_N)/4\pi = 73{,}5 \cdot 10^{-3}$ см³/моль	[13, 17]
GdSb	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel (111)$ $(2a, 2a, 2a)$	28	$\theta = -42$ К, $p = 8{,}1$	[3, 17]
GdTe	Кубическая O_h^5	—	80	—	[17]
GdBi	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel (111)$ $(2a, 2a, 2a)$	28—32	$p = 8{,}3$	[3, 17]
$GdCu_2$	Орторомбическая D_{2h}^{28}	—	41	$\theta = 11$ К, $p = 8{,}4$	[17]
$GdCoO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	A-тип МП (Gd)	2,9 (Gd)	$\mu_{Gd} = 7\mu_B$	[3]
$GdAlO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	3,87	$\theta = -4{,}81$ К, $\mu_0 H_{c\parallel} (0{,}5\text{ К}) = 1{,}1$ Тл*1	[17]
$GdVO_3$	Орторомбическая	—	7,5	$p = 8{,}0$	[17]
$GdVO_4$	Тетрагональная D_{4h}^{19}	—	2,49	При комнатной температуре обладает ферромагнитными свойствами	[105]
$Gd(OH)_3$	Гексагональная	$\mu \parallel C$	2,0	—	[17]
$Gd_{1,2}Mo_6S_8$	Ромбоэдрическая	—	0,8—0,9	Сверхпроводник при $T < 1{,}4$ К	[108, 109]
$SrGd_2O_4$	Орторомбическая	—	2,8	$\theta = -6$ К	[17]
$GdCl_3 \cdot 6H_2O$	—	—	0,182*2	—	[17]

*1 Поле опрокидывания подрешеток.
*2 Из измерений теплоемкости.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
Tb	Гексагональная D_{6h}^4	ГС при 216 К$<T<T_N$ $\mu \perp C$	229—230	Ферромагнетик при $T<216$ К	[3, 12]
TbAl	Орторомбическая D_{2h}^{11}	НКС $(2a, b, c)$	72	$\theta = 10 \div 24$ К, $p = 10$ $\mu_{Tb}(4{,}2\ К) = 8{,}8\ \mu_B$	[3, 13]
TbP	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel [111]$ $(2a, 2a, 2a)$		$\theta = 1$ К, $p = 9{,}2$, $n_s = 8$ $\mu_0 H_c = 0{,}43$ Тл $\mu_{Tb^{3+}} = 6{,}2\ \mu_B$	[3, 17]
TbCu	Кубическая O_h^1	С-тип МП $\mu \parallel (001)$ $(2a, 2a, a)$	177	$\theta = -20$ К, $p = 9{,}6$ $\mu_{Tb} = 8{,}6\ \mu_B$	[3, 13]
TbAs	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel [111]$ $(2a, 2a, 2a)$	10—12	$\theta = -4$ К, $p = 9{,}7$ $n_s = 7{,}9$ $\mu_0 H_c = 2{,}8$ Тл	[3, 17]
TbSe	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel [111]$	52	$\theta = -53{,}5$ К, $p = 9{,}8$ $\mu_{Tb}(4{,}2\ К) = 7{,}5\ \mu_B$	[3]
TbAg	Кубическая O_h^1	С-тип МП $\mu \parallel [001]$ $(2a, 2a, 2a)$	100—106	$\theta = -36 \div -11$ К $p = 9{,}4 \div 10{,}1$ $\mu_{Tb} = 8{,}3\ \mu_B$	[3, 13]
TbSb	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel [111]$ $(2a, 2a, 2a)$	14—17	$\theta = -14$ К, $p = 9{,}7$ $n_s = 7{,}5$ $\mu_0 H_c = 6{,}0$ Тл $\mu_{Tb^{3+}}(0\ К) = 8{,}2\ \mu_B$	[3, 17]
TbBi	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel [111]$ $(2a, 2a, 2a)$	18	$\theta = -33$ К, $p = 9{,}52$ $\mu_{Tb}(4{,}2\ К) = 7{,}9\ \mu_B$	[3, 17]
TbD_2	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [001]$*1	40	$\mu_{Tb}(4{,}2\ К) = 7{,}9\ \mu_B$	[3]
TbC_2	Тетрагональная D_{4h}^{17}	ГС, $k_0 \parallel [a]$ (изменение структуры при $T \approx 30$ К)	66	$\mu_{Tb}(4{,}2\ К) = 5{,}2\ \mu_B$	[3]
TbO_2	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \parallel (111)$ $(2a, 2a, 2a)$	3	$p = 7{,}8$ $\mu_{Tb^{4+}} = 6{,}25\ \mu_B$	[3]
$TbCu_2$	Орторомбическая D_{2h}^{28}	—	54	$\theta = -6$ К, $p = 9{,}8$	[13, 17]
$TbAg_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	ФВ в (100) АФВ между (100) $(2a, 2a, c)$	35	$\theta = -32$ К, $n_s = 8{,}95$	[3, 13]

*1 Соизмеримая СВ, распространяющаяся вдоль [001] с периодом $\tau = 2{,}4$ нм.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$TbZn_2$	Орторомбическая D_{2h}^{28}	НКС при $T_п < T < T_N$ КС при $T < T_п = 60$ К[*1] $\mu \parallel [b]$, $(a,\ b,\ 2c)$	75	μ_{Tb} (4,2 К) = 8,8 μ_B	[3]
$TbAu_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$ при $T < T_п = 42$ К[*2]	55	$\theta = -21$ К, $p = 9,8$ $\mu_{Tb^{3+}}$ (4,2 К) = $9\mu_B$ μ_{Tb} (42,6 К) = $5,1\mu_B$	[3, 13]
$TbPt_3$	Кубическая O_h^1	ФВ в (111) АФВ между (111) $(2a,\ a,\ a)$	20—22	$\theta = 17$ К, $p = 9,9$ $n_s = 8,4$	[3, 13]
α-Tb_2C_3	Кубическая T_d^6	$\mu \parallel [001]$	33	μ_{Tb} (4,2 К) = $6,9\mu_B$ $n_s = 9$	[3]
Tb_2O_3	—	—	2,4	$\theta = -13$ К, $p = 9,67$	[17, 108]
Tb_3Ni	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС $(2a,\ b,\ c)$	62	$\theta = -5$ К, $p = 10$	[3, 13]
Tb_3Nd	Тригональная D_{3d}^5	$\mu \perp C$	129	Ферромагнетик при низких температурах	[3]
Tb_4La	Тригональная D_{3d}^5	$\mu \perp C$	124	$\mu_{Tb} = 6,8\mu_B$	[3]
Tb_4Pr	Тригональная D_{3d}^5	$\mu \perp C$	130	Ферромагнетик при $T < 30$ К	[3]
TbOCl	Тетрагональная D_{4h}^7	$(2\sqrt{2}a,\ 2\sqrt{2}a,\ 4c)$		$p = 9,84$	[3]
$TbAlO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС $\alpha(\mu,\ [a]) = 34°$	3—5	μ_{Tb} (1,5 К) = $8,25\mu_B$	[3]
$TbVO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	КС (V) НКС (Tb)		μ_{Tb} (1,5 К) = $7,6\mu_B$ μ_V (4,2 К) = $1,3\mu_B$	[3]
$TbCoO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС $\alpha(\mu,\ [a]) = 33°$	3,3	μ_{Tb} (1,5 К) = $8,0\mu_B$	[3]
$BaTbO_3$	Тригональная D_{3d}^5	КС	36	μ_{Tb} (11 К) = $6,7\mu_B$	[3]
$TbCo_2Si_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	КС, $\mu \parallel C$	46	μ_{Tb} (4,2 К) = $9,12\mu_B$	[100]
$Tb_{1,2}Mo_6S_8$	Ромбоэдрическая	—	1,0	Сверхпроводник при $T < 2,05$ К Ферромагнетик при $H > H_{c2}(0)$ $\mu_0 H_{c2}(0) = 0,19$ Тл	[106, 107, 109]

[*1] $T_п = 55$ К [13]

[*2] При $T_п < T < T_N$ несоизмеримая СВ, поляризованная вдоль оси [c] и распространяющаяся вдоль оси [a].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
Tb_2O_2S	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel [110]$ $(a,\ 2a,\ 2c)$	—	$\theta = -17$ К, μ_{Tb} (1,5 К) = $= 8{,}36\,\mu_B$	[3]
Tb_2O_2Se	Тригональная D_{3d}^3	$\alpha(\mu,\ C) \approx 30°$ $(a,\ 2a,\ 2c)$	7	$\theta = -18$ К, $\mu_{Tb^{3+}}$ (1,5 К)= $=6{,}5\mu_B$	[3]
$Tb_3Al_5O_{12}$	Кубическая O_h^{10}	НКС	1,5	—	[11, 17]
Dy	Гексагональная D_{6h}^4	ГС при $T_c < T < T_N$ $T_c = 85 \div 90$ $\mu \perp C$	175—184	$\theta = 153$ К Ферромагнетик при $T < T_c$	[3, 12, 14]
DyP	Кубическая O_h^5	НКС при $T=1{,}8$ К		$\theta = 6$ К, $p = 9{,}9$ $n_s = 7{,}8$ $\mu_0 H_c = 1{,}7$ Тл	[17]
DyCu	Кубическая O_h^9	а) КС, С-тип МП*1 $\mu \parallel [001]$ б) НКС*1	61—64	$\theta = -26 \div -18$ К, $p = 10{,}7$ $\mu_{Dy^{3+}} = 10{,}6\mu_B$	[3, 13]
DyAs	—	—	8,5	$\theta = 2$ К, $p = 10{,}4$ $n_s = 8{,}1$ $\mu_0 H_c = 3{,}2$ Тл	[17]
DySb	Кубическая O_h^5	ФВ в (111) АФВ между (111) $\mu \parallel [001]$ $(2a,\ 2a,\ 2a)$	9,5	$\theta = -4$ К, $p = 10{,}7$ $n_s = 7{,}7$ $\mu_0 H_c = 1{,}95$ Тл μ_{Dy} (5,8 К) $= 9{,}4\mu_B$	[3, 17]
DyBi	Кубическая O_h^5	II тип МП $(2a,\ 2a,\ 2a)$	12—13	$\theta = -30$ μ_{Dy} (4,2 К) $= 8{,}7\mu_B$	[3, 17]
DyC_2	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel C$*2	59	μ_{Dy} (4,2 К) $= 8{,}37\mu_B$ $n_s = 11{,}8$	[3]
$DyCu_2$	Орторомбическая D_{2h}^{28}	—	24	$\theta = 5$ К, $p = 10{,}75$	[13, 17]
$DyGa_2$	Гексагональная D_{6h}^1	КС, $\mu \parallel [b]$ $(a,\ a,\ 2\sqrt{3}\ c)$	15	$\theta = -6$ К, $p = 10{,}7$ μ_{Dy} (4,2 К) $= 7{,}5\mu_B$	[3, 13]
$DyAg_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	При $T_N > T > T_п = 9$ К несоизмеримая структура*2, при $T < T_п$ соизмеримая структура	15	$\theta = -25$ К, $p = 10{,}5$ $\mu_0 H_{c\parallel} = 3{,}5$ Тл*3 μ_{Dy} (1,7 К) $= 7{,}4\mu_B$	[3, 13, 17]

*1 Возможные структуры.
*2 Несоизмеримая поперечная СВ, распространяющаяся вдоль оси [a].
*3 Поле опрокидывания подрешеток.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$DyAu_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	При $T_N > T > T_п = 25$ К несоизмеримая структура[*1], при $T < T_п$ соизмеримая структура	—	$\theta = -13 \div -24$ К, $p = 10{,}5$ $\mu_{Dy}(1{,}7\ К) = 9{,}2\mu_B$	[3, 13, 17]
$DyIn_3$	Кубическая O_h^1	ФВ в (110) АФВ между (110) $\alpha(\mu, [001]) = 27{,}5°$ $(a, a, 2a)$	23—24	$\theta = -35$ К, $p = 10{,}8$ $\mu_{Dy}(4{,}2\ К) = 8{,}8\mu_B$	[3, 13]
$DyPt_3$	Кубическая O_h^1	II тип МП $(2a, 2a, 2a)$	13	$\mu_{Dy} = 9{,}0\mu_B$	[3, 13]
DyB_6	Кубическая (О.Ц.К.)	—	20,5	$\theta = -21$ К, $p = 9{,}43$	[110]
DyOOH	Моноклинная C_{2h}^2	ФВ в (010) АФВ между (010) $\mu \parallel (010)$ $\alpha(\mu, [a]) = 80°$	—	$\mu_{Dy^{3+}}(4{,}2\ К) = 9{,}4\mu_B$	[3]
DyOCl	Тетрагональная D_{4h}^7	$\mu \parallel (001)$ $(a, a, 2c)$	9	$\mu_0 H_c(4{,}2\ К) = 1{,}4$ Тл	[3, 17]
$DyAlO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС $\alpha(\mu, [a]) = 57°$	3,4—3,5	$\mu_{Dy}(1{,}5\ К) = 8{,}2\mu_B$	[3, 17]
$DyCoO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\alpha(\mu, [a]) = 60°$	3,6	Ионы Co диамагнитны из-за сильного кристаллического поля; $\mu_{Dy}(1{,}5\ К) = 8{,}8\mu_B$	[3]
$DyPO_4$	Тетрагональная D_{4h}^{19}	G-тип МП $\mu \parallel C$	3,4	Магнитные свойства соответствуют модели Изинга, $d = 3$ $\mu_{Dy^{3+}}(1{,}8\ К) = 9{,}0\mu_B$	[3, 111]
$DyVO_4$	Тетрагональная D_{4h}^{19}	$\mu \parallel [b]$	3,0	$\mu_{Dy}(1{,}85\ К) = 9{,}0\mu_B$	[3, 17]
$DyAsO_4$	Тетрагональная D_{4h}^{19}	НКС $\mu \parallel (007)$	2,5—2,8	Ферромагнетик при $T < T_C = 11$ К	[3]
$Dy_{1,2}Mo_6S_8$	Ромбоэдрическая	$\mu \parallel [111]$	0,4	Сверхпроводник при $T < 2{,}05$ К $\mu_0 H_{c2}(0) = 0{,}12$ Тл Ферромагнитная компонента при $\mu_0 H > 2 \cdot 10^{-2}$ Тл $\mu_{Dy}(0{,}07\ К) = 8{,}77\mu_B$	[107, 109, 112]

[*1] Несоизмеримая поперечная СВ, распространяющаяся вдоль оси [a].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
Dy_2O_2S	Тригональная D^3_{3d}	$\mu \parallel [110]$ $(a,\ 2a,\ 2c)$	5,85	$\theta = -14{,}8$ К $\mu_{Dy}(1{,}5\ \text{К}) = 4{,}41\mu_B$	[3]
Dy_2O_2Se	Тригональная D^3_{3d}	$\mu \parallel C$ $(a,\ 2a,\ 2c)$	8,5	$\mu_{Dy^{3+}}(1{,}5\ \text{К}) = 9{,}0\mu_B$	[3]
$Dy_3Al_5O_{12}$	Кубическая O^{10}_h	НКС*1	2,5	$\mu_{Dy^{3+}}(1{,}3\ \text{К}) = 9{,}0\mu_B$	[3, 11, 17]
Ho	Гексагональная D^4_{6h}	ГС, $k_0 \parallel C$ при $T_N > T > T_C = 20$ К	130—133	При $T < T_C$ ферромагнитная спираль	[3, 12, 14]
HoSi	Орторомбическая D^{17}_{2h}	КС, $\mu \parallel [103]$ $(2a,\ b,\ 2c)$	25	$\theta = 2$ К, $p = 10{,}6$ $\mu_{Ho^{3+}}(4{,}2\ \text{К}) = 7{,}0\mu_B$	[3, 13]
HoAs	—	—	4,8	$\theta = 1$ К, $p = 10{,}5$ $n_s = 9{,}0$ $\mu_0 H_{c1} = 0{,}18$ Тл $\mu_{0c} H_{c2} = 0{,}6$ Тл	[17]
HoRh	Кубическая O^1_h	А-тип МП $\mu \parallel (001)$	3,2	$\theta = -3$ К, $p = 10{,}4$ $\mu_{Ho}(1{,}2\ \text{К}) = 5{,}2\mu_B$	[3]
HoSb	Кубическая O^5_h	II тип МП $\mu \parallel [100]$ $(2a,\ 2a,\ 2a)$	5—9	$\theta = -2{,}4$ К, $p = 10{,}8$ $n_s = 8{,}7$; $\mu_0 H_c = 1{,}5$ Тл, $\mu_{Ho^{3+}} = 9{,}3\mu_B$	[3, 17]
HoD_2	Кубическая O^5_h	НКС	8	$p = 9{,}9$	[3]
HoC_2	Тетрагональная D^{17}_{4h}	ГС, $k_0 \parallel [a]$	26	$\mu_{Ho}(4{,}2\ \text{К}) = 6{,}89\mu_B$	[3]
$HoCu_2$	Ортогональная D^{28}_{2h}	—	9	$\theta = -6$ К, $p = 10{,}5$	[13, 17]
$HoGa_2$	Гексагональная D^1_{6k}	КС, $\mu \parallel a$ $(2a,\ \sqrt{3}a,\ c)$	10	$\theta = -2$ К, $p = 10{,}7$ $\mu_{Ho}(4{,}2\ \text{К}) = 9{,}5\mu_B$	[3, 13]
$HoAg_2$	Тетрагональная D^{17}_{4h}	Несоизмеримая СВ*2, распространяющаяся вдоль оси $[a]$	5—8	$\theta = -13{,}5$ К	[3, 13]
$HoAu_2$	Тетрагональная D^{17}_{4h}	НКС	9	$\theta = -8{,}0$ К, $p = 10{,}97$	[3, 13]

*1 Магнитная структура представляет собой три группы взаимно ортогональных вложенных друг в друга магнитных подрешеток, направленных вдоль или против осей [100], [010] и [001].

*2 При $T > T_п = 4{,}7$ К продольная поляризация, при $T < T_п$ поперечная поляризация, параллельная оси C.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$HoIn_3$	Кубическая O_h^1	ФВ в (110) АФВ между (110) $(2a, a, 2a)$	11	$\theta = -18$ К, $p = 10{,}65$ $\mu_{Ho^{3+}}(4{,}2\ К) = 9\mu_B$	[3, 13]
α-Ho_2C_3	Кубическая T_d^6	$\mu \parallel [111]$	19	$p = 8{,}7$ $\mu_{Ho} = 7{,}3\mu_B$	[3]
$HoCoO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС $\alpha(\mu, [a]) = \pm 63°$	2,4	Ионы Co диамагнитны из-за сильного кристаллического поля $\mu_{Ho}(1{,}5\ К) = 7{,}0\mu_B$	[3]
Ho_2O_2S	Тригональная D_{3d}^3	КС, $\mu \parallel C$ $(a, 2a, c)$	2,5	$\theta = -8$ К $\mu_{Ho}(1{,}5\ К) = 7{,}9\mu_B$	[3]
Ho_2O_2Se	Тригональная D_{3d}^3	КС, $\mu \parallel C$ $(a\sqrt{3}, a, c)$	4	$\mu_{Ho}(1{,}5\ К) = 9{,}3\mu_B$	[3]
Er	Гексагональная D_{6h}^4	При $T > 52$ К[*1] $\mu \parallel C$, при $20 < T < 52$ К $\mu \parallel C$ и $\mu \perp C$	79—86	При $T < T_C = 20$ К ферримагнитная спираль	[3, 12, 14]
ErAl	Орторомбическая D_{2h}^{11}	НКС $(a, 2b, c)$	10—13	$\theta = 25$ К, $p = 9{,}7$ $\mu_{Er}(4{,}2\ К) = 7{,}0\mu_B$	[3, 13]
ErSi	Орторомбическая D_{2h}^{17}	КС $(2a, b, 2c)$	10	$\theta = -5$ К, $p = 9{,}38$ $\mu_{Er^{3+}}(4{,}2\ К) = 6{,}2\mu_B$	[3]
ErP	Кубическая O_h^5	II тип МП $\mu \perp [111]$	3—4	$\theta \approx 0$ К, $p = 9{,}3$ $n_s = 8{,}5$, $\mu_0 H_c = 0{,}52$ Тл $\mu_{Er} = 5{,}7\mu_B$	[3, 17]
ErAs	—	—	3,5	$\theta = -1{,}5$ К, $p = 9{,}6$ $n_s = 8{,}4$ $\mu_0 H_c = 1{,}05$ Тл	[17]
ErSb	Кубическая O_h^5	$\mu \perp [111]$ $(2a, 2a, 2a)$	3,5—3,7	$\theta = -3$ К, $p = 9{,}6$, $n_s = 7{,}3$ $\mu_0 H_c = 1{,}2$ Тл $\mu_{Er^{3+}} = 7\mu_B$	[3, 17]
ErRh	Кубическая O_h^1	А-тип МП $\mu \parallel (001)$ $(a, a, 2a)$	3,3	$\theta = -4$ К, $p = 9{,}4$ $\mu_{Er}(1{,}2\ К) = 6{,}1\mu_B$	[3, 13]
ErC_2	Тетрагональная D_{4h}^{17}	Набор несоизмеримых СВ при $T > 10$ К[*2]	19	$\mu_{Er}(2\ К) = 7{,}9\mu_B$	[3]

[*1] При 52 К $< T < T_N$ продольная СВ, распространяющаяся вдоль C с полупериодом семь атомных слоев; при $T < 52$ К добавляется компонента намагниченности в плоскости, перпендикулярной оси C.

[*2] При $T < 10$ К вклад в магнитную структуру дает соизмеримая антиферромагнитная СВ.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$ErCu_2$	Орторомбическая D_{2h}^{28}	—	11	$\theta = 4$ К, $p = 9{,}35$	[13, 17]
$ErAu_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel [b]$*1	6,7	$\theta = -4$ К, $p = 9{,}45$ $\mu_{Er} = 9{,}2\mu_B$	[3, 13]
α-$ErAl_3$	Тригональная D_{3d}^5	КС, $\mu \parallel C$ ($2a$, $2a$, c)	5—6	$\mu_{Er^{3+}}$ (2,15 К) $= 6{,}15\mu_B$	[3, 13]
β-$ErAl_3$	Кубическая O_h^1	С-тип МП $\mu \parallel (001)$ ($2a$, $2a$, a)	5	$\theta = -16$ К, $p = 9{,}87$ $n_s = 6{,}25$ $\mu_{Er^{3+}}$ (4,2 К) $= 5{,}1\mu_B$	[3]
$ErIn_3$	Кубическая O_h^1	С-тип МП ($2a$, $2a$, a)	6	$\theta = -10$ К, $p = 9{,}75$ $n_s = 7{,}3$	[3, 13]
Er_2O_3	Кубическая T_h^7	НКС	3,4	$\theta = -11$ К, $p = 10{,}5$ $\mu_{Er^{3+}\,I}$ (1,25 К) $= 6{,}06\mu_B$ $\mu_{Er^{3+}\,II}$ (1,25 К) $= 5{,}36\mu_B$	[3, 17, 108]
Er_3Co	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС (изменение структуры при $T = 7$ К)	13	$\theta = 20$ К, $\mu_{Er\,I} =$ $= \mu_{Er\,II}$ (4,2 К) $= 6{,}4\mu_B$	[3, 13]
Er_3Ni	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС $\alpha(\mu, [a]) = 29°$ ($2a$, $2b$, c)	5—9	$\theta = -6$ К, $p = 9{,}8$ $\mu_{Er\,I} = \mu_{Er\,II}$ (4,2 К) $=$ $= 6{,}9\mu_B$ μ_{Ni} (4,2 К) $= 0$	[3, 13]
ErOOH	Моноклинная C_{2h}^2	КС, $\mu \parallel [b]$	—	μ_{Er} (1,6 К) $= 7{,}14\mu_B$	[3]
$ErVO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu_V \parallel [b]$ $\mu_{Er} \parallel [c]$	20 (V) 16 (Er)	μ_V (4,2 К) $= 1{,}2\mu_B$ μ_{Er} (4,2 К) $= 4{,}25\mu_B$	[3]
$LaErO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	НКС	2,4	$p = 9{,}45$ μ_{Er} (1,5 К) $= 6{,}34\mu_B$	[3]
Tm	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel C$ при 40 К $< T < T_N$*2	56	При $T \leqslant T_C = 40$ К ферримагнитное упорядочение	[12, 14]
TmAl	Орторомбическая D_{2h}^{11}	НКС ($2a$, b, c)	11	$\theta = -2$ К, $\mu_{Tm\,I} =$ $= \mu_{Tm\,II}$ (4,2 К) $= 5{,}5\mu_B$	[3]
TmSi	Орторомбическая D_{2h}^{17}	КС (a, b, $2c$)	10	$\theta = 10$ К, $p = 7{,}45$ $\mu_{Tm^{3+}}$ (4,2 К) $= 5{,}0\mu_B$	[3, 13]

*1 Несоизмеримая поперечная СВ, распространяющаяся вдоль оси $[a]$; при $T < 4$ К добавляется соизмеримая антиферромагнитная СВ.
*2 При $T_C < T < T_N$ продольная СВ, распространяющаяся вдоль оси C с полупериодом семь атомных слоев.

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$TmAu_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	3,2—3,5	$p = 7{,}62$	[3, 13]
Yb_2O_3	Кубическая T_h^7	НКС $\mu_{Yb\,I} \parallel [111]$ $\mu_{Yb\,II} \parallel [101]$	2,3	$\mu_{Yb\,I}$ (1,25 К) $= 1{,}05\mu_B$ $\mu_{Yb\,II}$ (1,25 К) $= 1{,}86\mu_B$	[3]
Yb_2O_2S	Тригональная D_{3d}^3	КС $\mu \parallel [110]$	3	$\theta = -6{,}5$ К μ (1,5 К) $= 1{,}66\mu_B$	[3, 17]
Yb_2O_2Se	Тригональная D_{3d}^3	КС, $\mu \perp C$	—	μ_{Yb} (1,5 К) $= 1{,}6\mu_B$	[3]
K_2ReCl_6	Кубическая O_h^5	I тип МП	12	$\mu_{Re^{4+}}$ (4,2 К) $= 2{,}6\mu_B$ $n_s = 2{,}6$	[3, 17]
K_2ReBr_6	Кубическая O_h^5	I тип МП $\mu \parallel (001)$	15,3	—	[3]
K_2IrCl_6	Кубическая O_h^5	III тип МП $(a, a, 2a)$	3,0	$\theta = -32$ К	[3, 17, 113]
Rb_2IrCl_6	Кубическая O_h^5	—	1,8	$\theta = -17$ К	[113]
Cs_2IrCl_6	Кубическая O_h^5	—	0,5	$\theta = -4$ К	[113]
$(NH_4)_2IrCl_6$	Кубическая O_h^5	—	2,15	$\theta = -20$ К	[113]
UN	Кубическая O_h^5	I тип МП	50—55	$\theta = -200 \div -300$ К, $p=3$ $\mu_{U^{3+}}$ (4,2 К)$=0{,}75\mu_B$	[1, 3, 114]
UP	Кубическая O_h^5	—	122—125	$\theta = 49$ К, $p = 3{,}3$	[17, 114]
UGa	Ромбическая	—	27	—	[114]
UAs	Кубическая O_h^5	I тип МП $\mu \parallel [001]$	128	$\theta = 32$ К, $\mu_U = 1{,}89\mu_B$	[1, 3, 17, 114]
USb	Кубическая O_h^5	I тип МП	213—246	$\theta = 95$ К, $p = 3{,}85$ μ_U (4,2 К) $= 2{,}6\mu_B$	[1, 3, 114]
UBi	Кубическая O_h^5	—	285—290	$\theta = 115$ К	[114]
UO_2	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$*1	28—31	$\mu_{U^{4+}} = 1{,}7\mu_B$	[3, 17]

*1 Наиболее вероятна неколлинеарная трехлучевая магнитная структура с ориентацией магнитных моментов на атомах урана вдоль пространственных диагоналей куба [115].

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
UP_2	Тетрагональная D_{4h}^7	$\mu \parallel C$ (a, a, $2c$)	203—206	$\theta = 30$ К, $p = 2{,}4$ μ_U (80 К) $= 2{,}0\mu_B$	[3, 17]
UMn_2	Кубическая O_h^7	—	260	—	[114]
UAs_2	Тетрагональная D_{4h}^7	$\mu \parallel C$ (a, a, $2c$)	283	$\theta = 34$ К, $p = 2{,}9$ μ_U (4,2 К) $= 1{,}6\mu_B$	[3, 114]
USe_2	—	—	11—13	—	[114]
USb_2	Тетрагональная D_{4h}^7	$\mu \parallel C$ (a, a, $2c$)	206	$\theta = 18$ К, $p = 3{,}0$ μ_U (80 К) $= 0{,}94\mu_B$	[3, 114]
UHg_2	Тетрагональная C_{4h}^6	—	70	—	[114]
UBi_2	Тетрагональная D_{4h}^7	$\mu \parallel C$	183	$\theta = -53$ К, $p = 3{,}4$ μ_U (80 К) $= 2{,}1\mu_B$	[3, 17]
UGa_3	Кубическая O_h^1	G-тип МП ($2a$, $2a$, $2a$)	70	μ_U (4,2 К) $= 0{,}72\mu_B$	[3, 114]
UIn_3	Кубическая O_h^1	G-тип МП ($2a$, $2a$, $2a$)	95—100	$\theta = -215$ К	[3, 114]
UTe_3	—	—	56	—	[17]
UTl_3	Кубическая O_h^1	G-тип МП ($2a$, $2a$, $2a$)	80—90	$\theta = -150$ К, μ_U (4,2 К) $= 1{,}6\mu_B$	[3, 114]
UPb_3	Кубическая O_h^1	ФВ в (001) АФВ между (001) $\mu \parallel [001]$ (a, a, $2a$)	32	—	[3, 114]
UPd_4	Кубическая O_h^1	КС, $\mu \parallel (001)$ ($2a$, $2a$, a)	10—30	$\theta = -130$ К, $p = 3{,}47$ $\mu_U \approx 0{,}8\mu_B$	[3]
UCu_5	Кубическая T_d^2	КС, $\mu \perp (111)$ ФВ в (111) АФВ между (111)	15—16	μ_U (4,2 К) $= 0{,}9\mu_B$	[3, 114]
U_2N_3	Кубическая T_h^7	—	94—96	—	[114]
UOS	Тетрагональная D_{4h}^7	$\mu \parallel C$ (a, a, $2c$)	55	$\theta = -51$ К μ_U (4,2 К) $= 1{,}9\mu_B$	[3]
UOSe	Тетрагональная D_{4h}^7	$\mu \parallel C$	72	$\theta = -20 \div -130$ К $p = 2{,}87$ μ_U (4,2 К) $= 2{,}2\mu_B$	[3]

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
UOTe	Тетрагональная D_{4h}^7	$\mu \parallel C$	157—160	$\theta = -56 \div -60$ К μ_U (78 К) $= 2{,}7\mu_B$	[3]
U_2N_2P	Тригональная D_{3d}^3	КС, $\mu \parallel C$	366	μ_U (4,2 К) $= 1{,}7\mu_B$	[3]
U_2N_2S	Тригональная D_{3d}^3	КС, $\mu \parallel C$	233	μ_U (4,2 К) $= 1{,}3\mu_B$	[3]
U_2N_2As	Тригональная D_{3d}^3	КС, $\mu \parallel C$ (a, a, $2c$)	406	μ_U (4,2 К) $= 1{,}3\mu_B$	[3]
U_2N_2Se	Тригональная D_{3d}^3	КС, $\mu \parallel C$ (a, a, $2c$)	245	μ_U (4,2 К) $= 2{,}2\mu_B$	[3]
NpC	Кубическая O_h^5	—	310	$p = 3{,}37$ Ферромагнетик при $T < T_c =$ $= 200$ К $\mu_{Np} = 1{,}4\mu_B$*1	[17]
NpP	Кубическая O_h^5	—	130	—	[114]
NpS	Кубическая O_h^5	II тип МП	23*2	$p = 2{,}1$ μ_{Np}(4,2 К) $= 0{,}9\mu_B$	[3]
NpAs	Кубическая O_h^5	Продольная СВ при $T > T_п = 150$ К, I тип МП $\mu \parallel [001]$ при $T < T_п$	177	$(\mu_{Np})_{max} = 1{,}4\mu_B$ при $T_п < T < T_N$ μ_{Np} (4,2 К) $= 2{,}5\mu_B$	[3]
NpSb	Кубическая O_h^5	I тип МП	207	μ_{Np} (4,2 К)$=2{,}5\mu_B$	[3]
NpPt	Орторомбическая D_{2h}^{17}	—	27	—	[114]
NpO_2	Кубическая O_h^5	—	25,3	—	[17]
$NpCo_2$	Кубическая O_h^7	—	15	$\mu_{Np} = 0{,}5\mu_B$ $\mu_{Co} = 9{,}15\mu_B$	[3]
$NpAs_2$	—	—	180	—	[114]
$NpIr_2$	Кубическая O_h^7	—	7,5	—	[114]

*1 В ферромагнитном состоянии.
*2 При $T = T_N$ фазовый переход первого рода.

Продолжение табл. 28.1

Вещество	Структура		T_N, К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллографическая	магнитная			
$NpPd_3$	Кубическая O_h^1	КС, G-тип МП ($2a$, $2a$, $2a$)	55	μ_{Np} (4,2 К) $= 2{,}0\mu_B$	[3, 114]
$NpSn_3$	Кубическая O_h^1	—	9,5	—	[114]
NpB_4	—	—	52,5	—	[114]
PuN	Кубическая O_h^5	—	13	—	[114]
$PuRh_3$	Кубическая O_h^1	—	6,2	—	[114]
$PuPd_3$	Кубическая O_h^1	—	24	—	[114]
$PuBe_{13}$	Кубическая O_h^6	—	11,5	—	[114]
Pu_3S_4	Кубическая	—	10	—	[114]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вонсовский С. В.** Магнетизм. М.: Наука, 1971.
2. **Боровик-Романов А. С.** Итоги науки. Физико-математические науки. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Вып. 4. Антиферромагнетизм.
3. **Oleś A., Kajzar M., Kucab W. e. a.** Magnetic structures determined by neutron diffraction. Warszawa: Krakow państwowe wydawnictwo naukowe, 1976.
4. **Кричик Г. С.** Физика магнитных явлений. М.: МГУ, 1985.
5. **Боровик-Романов А. С.** Антиферромагнетики с анизотропией типа легкая плоскость//Проблемы магнетизма. М.: Наука, 1972. С. 47—58.
6. **Александров К. С., Федосеева Н. В., Спевакова И. П.** Магнитные фазовые переходы в галлоидных кристаллах. Новосибирск: Наука, 1983.
7. **Еременко В. В.** Введение в оптическую спектроскопию магнетиков. Киев: Наукова думка, 1975.
8. **Туров Е. А., Петров М. П.** Ядерный магнитный резонанс в ферро- и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1969.
9. **Изюмов Ю. А., Найш В. Е., Озеров Р. П.** Нейтроны и твердое тело. М.: Атомиздат, 1981. Т. 2. Нейтронография магнетиков.
10. **Туров Е. А.** Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
11. **Редкоземельные** ионы в магнитоупорядоченных кристаллах/А. К. Звездин, В. М. Матвеев, А. А. Мухин, А. И. Попов. М.: Наука, 1985. **Ориентационные** переходы в редкоземельных магнетиках/К. П. Белов, А. И. Звездин, А. М. Кадомцева, Р. З. Левитин. М.: Наука, 1979.
12. **Тикадзуми С.** Физика ферромагнетизма: Пер. с яп. М.: Мир, 1983.
13. **Buschow K. H. J.**//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam — New Yok — Oxford: North-Holland Publ. Comp., 1980. Vol. 1. P. 297—414.
14. **Legvold S.**//Ibid. P. 183—295.
15. **Keffer F.**//Handbuch der Physik. Berlin. Springer, 1966. Bd 18/2. S. 1—207.
16. **Morrish A. H.** The Physical Principals of Magnetism. N. Y.: John Willey and Sons, Inc., 1965.
17. **Ожогин В. И., Шапиро В. Г.** Глава 30. Антиферромагнетики//Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. С. 600—633.
18. **Hurd C. M.**//Contemp. Phys. 1982. Vol. 23, № 5. P. 469—493.
19. **Bizette H., Tsai B.**//Compt. Rend. 1954. Vol. 238. P. 1575—1576.
20. **Stout J. W., Adams H. E.**//J. Amer. Chem. Soc. 1942. Vol. 64. P 1535—1537.
21. **Jacods J. S.**//Appl. Phys. 1961. Vol. 32S. P. 61—64.
22. **Shapira Y., Foner S.**//Phys. Rev. B. 1970. Vol. 1, № 7. P. 3083—3096.
23. **Low G. G., O Okazaki A., Stevenson R. W. H. e. a.**// J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35, № 3. P. 998—999.
24. **Johnson F. M., Nethercot A. H. Jr.**//Phys. Rev. 1959. Vol. 114. P. 705—714.
25. **Еременко В. В., Беляева А. И.**//Успехи физ. наук. 1969. Т. 98, вып. 1. С. 27—70.
26. **Allen S. J. Jr., Loudon R., Richards P. L.**//Phys. Rev. Lett. 1966. Vol. 16. P. 463—465.
27. **Green R. L., Sell D. D., Yen W. M.**//Ibid. 1965. Vol. 15, № 6. P. 656—659.
28. **Харченко Н. Ф., Еременко В. В.**//Физика конденсированного состояния. Харьков: ФТИ низких температур АН УССР, 1971. Вып. XIII. С. 3—45.
29. **Боровик-Романов А. С.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1959. Т. 36, вып. 3. С. 766—781.

30. **Ожогин В. И.**//Там же. 1970. Т. 58, вып. 6(6). С. 2079—2089.
31. **Боровик-Романов А. С., Прозорова Л. А.**//Там же. 1968. Т. 55, вып. 5(11). С. 1727—1736.
32. **Боровик-Романов А. С., Рудашевский Е. Г.**//Там же. 1964. Т. 47, вып. 6(12). С. 2095—2101.
33. **Боровик-Романов А. С., Крейнес Н. М., Прозорова Л. А.**//Там же. 1963. Т. 45, вып. 2(8). С. 64—70.
34. **Ozhogin V. I., Maximenkov P. P.**//Digests of Intermag. Conf., Kyoto, 1972. P. 494; **Seavey M. H.**//Solid State Commun. 1972. Vol. 10. P. 219—221.
35. **Боровик-Романов А. С., Крейнес Н. М., Жотиков В. Г.** Проблемы магнитного резонанса. М.: Наука, 1978.
36. **Borovik-Romanov A. S., Prozorova L. A.**//J. Physiq. 1971. Vol. 32. P. C1—837.
37. **Ожогин В. И., Якубовский А. Ю.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1972. Т. 63, вып. 6. С. 2155—2158.
38. **Ozhogin V. I., Inyushkin A. V., Babushkina N. A.**// J. Magnetism and Magnetic Materials. 1983. Vol. 31—34. P. 147—148.
39. **Jakobs I. S., Lawrence P.**//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 996—999.
40. **Gillot M., Eremenko V. V., Marchand A. e. a.**// Proc. Intern. Symp. on High Field Magnetism, Osaka, 1982/Ed. by M. Date. Amsterdam — New York — Oxford: North-Holland Publ. Comp., 1983. P. 63—65.
41. **Дзялошинский И. Е.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1957. Т. 32, вып. 6. С.1547—1562.
42. **Боровик-Романов А. С., Ожогин В. И.**//Там же. 1960. Т. 39, вып. 1(7). С. 27—36.
43. **Ожогин В. И.**//Там же. 1963. Т. 45, вып. 5. С. 1687—1690.
44. **Ожогин В. И., Шапиро В. Г.**//Там же. 1968. Т. 54, вып. 1. С. 96—108.
45. **Крейнес Н. М.**//Там же. 1961. Т. 40, вып. 3. С. 762—774.
46. **Боровик-Романов А. С.**//Там же. 1960. Т. 38, вып. 4. С. 1088—1098.
47. **Боровик-Романов А. С.**//Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983. С. 597.
48. **Астров Д. Н.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 40, вып. 4. С. 1035—1041.
49. **Hornreich R. M.**//Digests of the Intermag. Conf. Kyoto, 1972. P. 40. 4.
50. **Schmid H.** Intern. J. Magnetism. 1974. Vol. 4. P. 337—361.
51. **Ожогин В. И.**//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1973. Т. 42, № 8. С. 1625—1637.
52. **Буздин А. И., Булаевский Л. Н.**//Успехи физ. наук. 1984. Т. 144, вып. 3. С. 415—437.
53. **Mortensen K., Tomkiewicz Y., Bechgaard K.**//Phys. Rev. B. 1982. Vol. 25, № 5. P. 3319—3325.
54. **Scott I. S.**//J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, № 3. P. 1845—1848.
55. **Walsh W. M. Jr., Wudl F., Aharon-Shalom E. e. a.**//Phys. Rev. Lett. 1982. Vol 49, № 12. P. 885—888.
56. **Смоленский Г. А., Недлин Г. М.**//Физика магнитных диэлектриков. Л.: Наука, 1974. С. 8—34.
57. **Белов К. П., Соколов В. И.**//Успехи физ. наук. 1977. Т. 121, вып. 2. С. 285—317.
58. **Физика** и химия редкоземельных элементов: Справочник/Под. ред. К. Гшнайдера и Л. Айринга: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1982.
59. **Goral J. P., Greedan J. E.**//J. Magnetism and Magnetic Materials. 1983. Vol. 37. P. 315—321.
60. **Wiedenmann A., Venien J. P., Palvadeau P. e. a.**// J. Phys. C.: Solid State Phys. 1983. Vol. 16. P. 5339—5350.
61. **Коидорский Е. И., Костина Т. И., Галкина В. Ю.**// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1975. Т. 69, вып. 5(11). С. 1753—1755.
62. **Nishihara Y., Yamaguchi, Waki S. e. a.**//J. Phys. Soc. Japan. 1983. Vol. 52, № 7. P. 2301—2303.
63. **Tripathi A. K., Lal H. B.**//Indian J. Pure and Appl. Phys. 1982. Vol. 20. P. 271—275.
64. **Крупичка С.** Физика ферритов и родственных им магнитных окислов: Пер. с нем. М.: Мир, 1976. Т. 1.
65. **Yoshimura K., Nakamura Y.**//J. Magnetism and Magnetic Materials. 1983. Vol. 40. P. 55—60.
66. **Oleveira N. F., Shapira Y.**//J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50, № 3. P. 1790—1795.
67. **Gurewitz E., Horowitz A., Shaked H.**//Phys. Rev. 1979. Vol. 20, № 11. P. 4544—4549.
68. **Zandbergen H. W.**// J. Solid State Chem. 1981. Vol. 37. P. 189—203.
69. **Rimet R., Buder R., Schlenker C. e. a.**//Solid State Commun. 1981. Vol. 37. № 9. P. 693—697.
70. **Kotlicki A., McLeod B. A., Shott M. e. a.**//Phys. Rev. 1984. Vol. 29, № 1. P. 26—31.
71. **Phaff A. C., Swüste C. H. W., Kopinga K. e. a.**// J. Phys. C.: Solid State Phys. 1983. Vol. 16. P. 6635—6649.
72. **Simizu S., Chen I. Y., Fridberg S. A.**//J. Appl. Phys. 1984. Vol 55, № 6, pt 2B. P. 2398—2400.
73. **Takeda K., Koyama K.**//J. Phys. Soc. Japan. 1983. Vol. 52, № 2. P. 648—655.
74. **Lhao M. G., Du M. L.**//Phys. Rev. B. 1983. Vol. 28, № 11. P. 6481—6484.
75. **Ожогин В. И., Шапиро В. Г., Гуртовой К. Г. и др.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1972. Т. 62, вып. 6. С. 2221—2232.
76. **Уайт Р.**//Успехи физ. наук. 1971. Т. 103, вып. 4. С. 593—607.
77. **Wada N., Ubukoshi K., Hirakawa K.**//J. Phys. Soc. Japan. 1982. Vol. 51, № 9. P. 2833—2839.
78. **Renaudin J., Pannetier J., Peland S.**//Solid State Commun. 1983. Vol. 47, № 6. P. 445—447.
79. **McAlister S. R., Strobel P.**//J. Magnetism and Magnetic Materials. 1983. Vol. 30. P. 340—348.
80. **Белов Н. В., Головастиков Н. И., Иващенко А. Н. и др.**//Кристаллография. 1982. Т. 27, вып. 3. С. 511—515.
81. **Sugano T., Kinoshita M., Shirotani I.**//Solid State Commun. 1983. Vol. 45, № 2. P. 99—102.
82. **Jaccarino V.**//Phys. Rev. 1959. Vol. 2, № 4. P. 163—168.
83. **Гуртовой К. Г., Лагутин А. С., Ожогин В. И.**// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1982. Т. 83, вып. 5. С. 1941—1954.
84. **Бажан А. Н.**//Там же. 1974. Т. 67, вып. 4(10). С. 1520—1526.
85. **Котюжанский Б. Я., Прозорова Л. А., Свистов Л. Е.**//Там же. 1985. Т. 88, вып. 1. С. 221—228.
86. **Brown P. J., Welford P. J., Forsyth J. B.**//J. Phys. C.: Solid State Phys. 1973. Vol. 6. P. 1405—1413.
87. **Tsuda T., Yasuoka H.**//J. Phys. Soc. Japan. 1978. Vol. 45, № 1. P. 115—121.
88. **Breed D. I., Gilianse K., Miedema A. R.**//Physica. 1969. Vol. 45, № 2. P. 205—211.
89. **Bartolome P., Navarro R., Gonzalez D.**//Ibid. 1977. Vol. 92B, № 1. P. 45—51.
90. **Carlin R. L., van der Bilt A., Jong K. O.**//Ibid. 1981. Vol. 111BC, № 2—3. P. 147—154.
91. **Burgiel J. S., Jaccarino V., Schawlow A. L.**//Phys. Rev. 1961. Vol. 122, № 2. P. 429—436.
92. **Bastow T. J., Whitfield H. J., Bristow G. K.**// Phys. Lett. 1981. Vol. 84A, № 5. P. 266—268.
93. **Adachi A., Achiva N., Mekata M.**//J. Phys. Soc. Japan. 1980. Vol. 49, № 2. P. 545—552.
94. **Saez Puche R., Norton M., White T. R. e. a.**//J. Solid State Chem. 1983. Vol. 50. P. 281—293.
95. **Phaff A. C., Swüste C. H. W., de Jonge W. J. H.**

e. a.//J. Phys. C: Solid State Phys. 1984. Vol. 17. № 14. P. 2583—2594.
96. **Васюков В. Н., Журавлев А. В., Лукин С. Н. и др.**//Физ. твердого тела. 1984. Т. 26, вып. 5. С. 1297—1305.
97. **Barbara B., Boucherle J. X., Buevoz J. L. e. a.**// Solid State Commun. 1977. Vol. 24, P. 481—484.
98. **Aarts J., de Boer F. R., Horn S. e. a.**//Physika. 1981. Vol. 107 B. P. 381—382.
99. **Hanzawa K., Kasuya T.**//J. Phys. Soc. Japan. 1984. Vol. 53. P. 1809—1818.
100. **Yakinthous J. K., Routsi Ch., Penelope Schobinger-Paramantellous**//J. Phys. Chem. Solids. 1984. Vol. 45, № 6. P. 689—693.
101. **Ellingsen O. S., Bratsberg H., Mroczkowsky S.**// J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, N 11, pt 2. P. 7948—7950.
102. **Hamaker H. C., Woolf L. D., Mac Kay H. B. e. a.**//Solid State Commun. 1979. Vol. 31, № 3. P. 139—144.
103. **Hamaker H. C., Woolf L. D., Mac Kay H. B. e. a.**//Ibid. 1979. Vol 32, № 4. 289—294.
104. **Lee K., Muir H.**//J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 1043—1045.
105. **Gaur K., Tripathi A. K., Lal H. B.**//J. Materials Sci. Lett. 1983. Vol. 2. P. 161—162.
106. **Ishikawa M., Muller J.**//Solid State Commun. 1978. Vol. 27, № 8. P. 761—763.
107. **Буздин А. И., Булаевский А. Н., Кулич М. Л. и др.**//Успехи физ. наук. 1984. Т. 144, вып. 4. С. 597—680.
108. **Тейлор К., Дарби М.** Физика редкоземельных элементов: Пер. с англ. М.: Мир, 1974.
109. **Thomlinson W., Shirane G., Moncton D. E. e. a.**// J. Appl. Phys. 1970. Vol. 50, № 3, pt 2. P. 1981—1982.
110. **Ali N., Woods S. B.**//J. Low Temp. Phys. 1984. Vol. 56, N 56. P. 575—584.
111. **Schienle M., Kasten A., Muller P. H.**//Phys. status solidi (b). 1983. Vol. 119, N 2. P. 611—620.
112. **Moncton D. E., Shirane G., Thomlinson W. e. a.**// Phys. Rev. Lett. 1978. Vol. 41, № 16. P. 1133—1136.
113. **Raaen A. M., Svare J., Pedersen V.**//Physica. 1983. Vol. 121 B. P. 89—94.
114. **Trezebiatowski W.**//Ferromagnetic Materials/Ed. by E. P. Wohlfarth. Amsterdam — New York — Oxford; North-Holland Publ. Comp., 1980. P. 415—449.
115. **Изюмов Ю. А.**//Успехи физ. наук. 1980. Т. 131, вып. 3. С. 387—422.
116. **Lottermoser W., Müller R., Fuess M.**//J. Magnetism and Magnetic Materials. 1986. Vol. 54—57, pt. 2. P. 1005—1006.
117. **Боровик-Романов А. С., Котюжанский Б. Я., Прозорова Л. А.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1970. Т. 58, вып. 6(6). С. 1911—1918.
118. **Александров К. С., Аинстратов А. Т., Мельникова С. В. и др.**//Физика твердого тела. 1979. Т. 21, № 4. С. 1119—1124.
119. **Buyers W. J. L., Morrs R. M., Armstrong R. L. e. a.**//Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 56, № 4. P. 371—373.
120. **Cox D. E., Shapiro S. M., Cowley R. A. e. a.**// Phys. Rev. B. 1979. Vol. 19, № 1. P. 5754—5772.
121. **Валянская Т. В., Плахтий В. П., Соколов В. И.**// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1976. Т. 70, вып. 6. С. 2279—2285.
122. **Прозорова Л. А., Марченко В. И., Красняк Ю. В.**//Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41, вып. 12, С. 522—524.

Глава 29
ФЕРРИТЫ И ДРУГИЕ МАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

М. В. Быстров, В. Л. Ивашинцева, С. А. Миронов, Р. В. Писарев

29.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Магнитные свойства. Среди магнитоупорядоченных материалов в особую группу выделяют ферримагнетики, или, иначе, ферриты. В отличие от простых ферромагнетиков, или антиферромагнетиков, характерной особенностью которых является расположение магнитных атомов в трансляционно-эквивалентных узлах, к ферримагнетикам относят материалы, в которых имеются неэквивалентные в кристаллографическом и (или) в магнитном отношении подрешетки. При таком определении ферримагнетизма ферромагнетик представляет собой частный случай ферримагнетика с одной магнитной подрешеткой, а простой антиферромагнетик — частный случай ферримагнетика с двумя эквивалентными подрешетками. Наличие неэквивалентных подрешеток определяет богатство магнитных свойств ферримагнетиков, отличающихся от свойств ферро- и антиферромагнетиков, хотя при определенных условиях можно найти общие черты среди этих различных групп магнетиков.

Магнитные свойства ферримагнетиков были впервые объяснены Неелем [1] на основе двухподрешеточной модели, предложенной им для ферритов со структурой шпинели (см. ниже), в которой магнитные ионы занимают тетраэдрические позиции (узлы A) и октаэдрические позиции (узлы B). Основным взаимодействием является антиферромагнитное (отрицательное) взаимодействие между ионами из различных подрешеток, что вызывает антипараллельное расположение их магнитных моментов. При этом результирующую намагниченность (на 1 м^3 вещества) можно представить в виде разности намагниченностей подрешеток:

$$M_s(T, H) = M_B(T, H) - M_A(T, H). \qquad (29.1)$$

Поведение величины M_s в зависимости от температуры и поля может носить более сложный характер, чем в ферромагнетиках, так как характер изменения M_A и M_B с температурой и с полем может быть различным. Так, при повышении температуры может быть монотонное уменьшение M_s и обращение M_s в нуль в точке Кюри T_C, выше которой вещество парамагнитно, хотя парамагнитная восприимчивость изменяется с температурой по закону, отличающемуся от закона Кюри для простых парамагнетиков. При повышении температуры в области ниже T_C возможно также увеличение спонтанной намагниченности в определенном температурном интервале. Для некоторых ферритов, в частности для многих редкоземельных ферритов — гранатов (см. табл. 29.15 и рис. 29.22), существует температура компенсации $T_{комп}$, при которой намагниченности подрешеток становятся одинаковыми и результирующая намагниченность обращается в нуль. Появление точки компенсации возможно также при изменении состава ферримагнетика, например в иттрий-железо-галлиевых гранатах.

При описании магнитных свойств ферритов пользуются также удельной намагниченностью насыщения

$\sigma_s = M_s/d$, где d — плотность. Предел σ_s при температуре, стремящейся к нулю, обозначают σ_s^0. Связь между σ_s^0 и числом магнетонов Бора n_B на одну формульную единицу феррита дается выражением

$$n_B = \frac{M}{N_A \mu_B} \sigma_s^0, \qquad (29.2)$$

где μ_B — магнетон Бора; M — молекулярная масса, соответствующая одной формульной единице; N_A — число Авогадро. Магнитный момент на молекулу p_m^0 при $T=0$ определяется как

$$p_m^0 = \left(n_B - n_A \right) \mu_B, \qquad (29.3)$$

где n_A, n_B — число магнетонов Бора, приходящихся на атомы в позициях A и B соответственно.

Энергию магнитного взаимодействия, зависящую от ориентации намагниченности относительно кристаллографических осей, называют энергией магнитной кристаллографической анизотропии. Для кубического кристалла (к ним относятся ферриты со структурой шпинели и граната) эту энергию E_a обычно записывают в виде [2]

$$E_a = K_1 \left(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2 \right) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \ldots, \qquad (29.4)$$

где K_1, K_2 ... — константы анизотропии, а α_1, α_2, α_3 — направляющие косинусы вектора намагниченности относительно осей, совпадающих с ребрами куба. Магнитную анизотропию можно характеризовать с помощью эффективного внутреннего поля напряженностью $H_a = 2K_1/M_s$.

Под действием магнитострикции при изменении намагниченности в кристалле происходит деформация кристаллической решетки. В частном случае феррита кубической структуры относительная магнитострикционная деформация может быть представлена в виде

$$\frac{\Delta l}{l} = \lambda_s = \frac{3}{2} \lambda_{100} \left(\alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \beta_3^2 - \frac{1}{3} \right) + 3\lambda_{111} (\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_1 \alpha_3 \beta_1 \beta_3), \qquad (29.5)$$

где λ_{100} и λ_{111} — константы магнитострикции насыщения в направлениях [100] и [111] соответственно, а β_1, β_2, β_3 — направляющие косинусы оси, вдоль которой измеряется деформация.

Феррит, помещенный в постоянное магнитное поле напряженностью H_0 и перпендикулярное к нему переменное СВЧ-магнитное поле, поглощает СВЧ-энергию. Это поглощение носит резонансный характер (ферромагнитный резонанс) и максимально на частоте ω_0, определенным образом связанной с полем H_0. Зависимость резонансной частоты ω_0 от H_0 имеет сложный характер и определяется магнитной кристаллографической анизотропией, анизотропией формы, упруго напряженным состоянием образца и т. п. [3]. В наиболее простом случае изотропной сферы

$$\omega_0 = \gamma H_0. \qquad (29.6)$$

Здесь γ — гиромагнитное отношение:

$$\gamma = g \frac{e}{2mc}, \qquad (29.7)$$

где e — заряд электрона; m — масса покоя электрона; c — скорость света; g — фактор спектроскопического расщепления. Для ферритов со структурой шпинели при наличии двух подрешеток значение g-фактора дается выражением [4]

$$g = \frac{M_B - M_A}{M_B / g_B - M_A / g_A}, \qquad (29.8)$$

где g_A и g_B — факторы спектроскопического расщепления для ионов в A- и B-узлах соответственно.

Амплитуда и форма резонансной кривой поглощения определяются процессами релаксации. Наличие их приводит к тому, что компоненты тензора магнитной проницаемости становятся комплексными величинами. При отсутствии внешнего магнитного поля магнитная проницаемость скалярна. Ширина резонансной кривой ферромагнитного резонанса ΔH обычно определяется как разность полей, при которых мнимая часть диагональной компоненты тензора проницаемости μ'' составляет половину своего значения $\mu''_{рез}$ в точке резонанса. Зависимость ее вещественной μ' и мнимой μ'' частей от частоты называют магнитными спектрами. Для магнитных спектров ферритов характерно наличие двух областей дисперсии. Низкочастотная область дисперсии обусловлена смещением границ доменов, а более высокочастотная — «естественным» ферромагнитным резонансом в эффективных полях анизотропии и размагничивающих полях.

Упругие свойства и магнитоупругое взаимодействие. Магнитоакустические эффекты в ферритах возникают в результате взаимодействия спинов магнитных ионов и упругих колебаний кристаллической решетки, т. е. в результате тех же взаимодействий, которые определяют магнитострикционные эффекты. Выражение для упругой и магнитоупругой энергий можно записать в виде

$$E_y + E_{My} = \frac{1}{2} c_{11} \left(e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2 \right) + \frac{1}{4} c_{44} \left(e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{zx}^2 \right) + c_{12} (e_{xx} e_{yy} + e_{yy} e_{zz} + e_{zz} e_{xx}) + B_1 \left(\alpha_x^2 e_{xx} + \alpha_y^2 e_{yy} + \alpha_z^2 e_{zz} \right) + B_2 (\alpha_x \alpha_y e_{xy} + \alpha_y \alpha_z e_{yz} + \alpha_z \alpha_x e_{zx}), \qquad (29.9)$$

где $c_{11} = c_{1111}$, $c_{12} = c_{1122}$, $c_{44} = c_{2323}$ — коэффициенты упругой жесткости, $B_1 = b_{1111}$, $B_2 = b_{2323}$ — магнитоупругие коэффициенты.

Условия для упругой и магнитоупругой изотропии следующие:

$$c_{11} - c_{12} = 2c_{44}; \quad B_1 = B_2. \qquad (29.10)$$

Первое условие выполняется, например, в иттриевом феррите-гранате с погрешностью до 5%. Значения коэффициентов, определяющих упругие и магнитоупругие свойства, см. в табл. 29.18, 29.21, 29.22.

Оптические и магнитооптические свойства. Ферриты обладают сравнительно высокой прозрачностью в ряде участков ближнего и далекого инфракрасного спектров. Ферриты-гранаты характеризуются лучшей прозрачностью, чем ферриты-шпинели. Так, в иттриевом феррите-гранате имеются окна прозрачности при длинах волн $1 < \lambda < 0{,}1$ мм и $1 < \lambda < 10$ мкм; между двумя этими областями наблюдается сильное решеточное поглощение. В редкоземельных ферритах-гранатах в первой области прозрачности могут наблюдаться поглощение при ферромагнитном резонансе (если поле анизотропии велико) в случае обменного резонанса редкоземельной подрешетки в поле железных подрешеток, а также электронные переходы между уровнями основного мультиплета редкоземельных ионов. Во второй области наблюдаются электронные переходы в редкоземельных ионах и (при более коротких длинах волн) электронные переходы в ионах железа в октаэдрических и тетраэдрических позициях. Ферриты-гранаты в видимой и ближней инфракрасных областях спектра обнаруживают значительный эффект Фарадея при распространении света вдоль вектора намагниченности и примерно такой же по модулю эффект Коттона — Мутона (магнитное линейное двупреломление) при распространении света перпендикулярно вектору намагниченности [109—110].

Ниже рассмотрены характерные особенности структуры и магнитных свойств различных групп ферритов, наиболее интересных в научном и техническом аспектах, а именно ферритов со структурой шпинели, граната, гексаферритов. Кроме того, приведены некоторые сведения о свойствах халькогенидных шпинелей, обладающих ферромагнитными и антиферромагнитными свойствами, а также сведения о ферромагнитных и антиферромагнитных халькогенидах европия и других ферромагнетиков с различной структурой. Свойства большого и важного класса ортоферритов рассмотрены в главе об антиферромагнетиках.

29.2. ФЕРРИТЫ-ШПИНЕЛИ

Ферриты-шпинели имеют кристаллическую структуру типа минерала шпинели $MgAl_2O_4$ и химическую формулу $Me^{3+}Fe_2^{2+}O_4$, где Me^{2+} — ион двухвалентного металла, а ионы железа Fe^{3+} — трехвалентны. В случае простых ферритов Me представляет собой один из двухвалентных ионов переходных элементов, например Mn, Ni, Co или Mg; возможна также комбинация этих ионов (твердые растворы ферритов или смешанные ферриты). Трехвалентные ионы железа в $MeFe_2O_4$ могут быть полностью или частичво замещены другими трехвалентными ионами, иапример Al^{3+} или Cr^{3+} (смешанные ферриты-алюминаты или ферриты-хромиты).

В структуре типа шпинели ионы кислорода образуют гранецентрированную кубическую решетку с ребром a. В промежутках между ионами кислорода находятся ионы металлов, причем эти ионы окружены четырьмя или шестью ионами кислорода. Такие окружения называют соответственно тетраэдрическими (или A) и октаэдрическими (или B) позициями. Шпинели, в которых ионы Me^{2+} находятся в тетраэдрических позициях, а ионы Fe^{3+} — в октаэдрических, называют нормальными. Если ионы Me^{2+} и половина ионов Fe^{3+} находятся в октаэдрических позициях, то шпинель называют обращенной. При смешанном распределении двухвалентные ионы металла находятся как в A-, так и в B-позициях.

Принято ионы, занимающие тетраэдрические позиции, записывать в формуле феррита перед квадратными скобками, а ионы, занимающие октаэдрические позиции, — в скобках. Тогда, например, формула цинкового феррита, имеющего структуру нормальной шпинели, запишется в виде $Zn^{2+}[Fe_2^{3+}]O_4$, никелевого феррита со структурой обращенной шпинели — в виде $Fe^{3+}[Ni^{2+}Fe^{3+}]O_4$, а распределение ионов смешанной марганцевой шпинели — формулой $Fe_{0,2}^{3+}Mn_{0,8}^{2+}[Mn_{0,2}^{2+}Fe_{1,8}^{3+}]O_4$.

Свойства ферритов-шпинелей отражены в табл. 29.1—29.9 и на рис. 29.1—29.19.

А. Простые ферриты

Таблица 29.1. **Значения основных параметров простых ферритов со структурой шпинели**

пк — поликристаллический; мк — монокристаллический; тетр — тетрагональный; куб — кубический

Параметр*1	Fe_3O_4	$MgFe_2O_4$	$MnFe_2O_4$	$CuFe_2O_4$
Постоянная решетки a, нм	0,839 [5]	0,836 [50]	0,8517 [23]	0,837 (куб.)*2 [34] $c = 0,870$ $a = 0,822$ } (тетр.) [35]
Распределение катионов	$Fe[Fe^{2+}Fe]$ [6]	$Mg_{0,1}Fe_{0,9}$, $[Mg_{0,9}Fe_{1,1}]$ [50, 51]	$Mn_{0,8}Fe_{0,2}$, $[Mn_{0,2}Fe_{1,8}]$ [23]	Fe[CuFe] [36]
Кислородный параметр u	0,379 [6]	0,381 [50]	0,385 [23]	0,380 [12]
Рентгеновская плотность d_X, 10^3 кг/м^3	5,24 [6]	4,52 [50]	5,0 [23]	5,35 [12]
Температура Кюри T_C, К	858 [5]	713 [5]	573 [5]	728 [5]
Магнитный момент на молекулу p_m^0, μ_B	4,1 (0 К) [6]	1,1 (25 К) [52]	4,6 (0 К) [23]	2,3 (куб) (0 К) [37] 1,3 (тетр) (0 К) [37]
Удельная намагниченность насыщения σ_s, А · м^2/кг	98 (0 К) [5] 92 (300 К) [5]	31 (0 К) [58] 27 (300 К) [5]	112 (0 К) [58] 80 (300 К) [5]	30 (0 К) [5] 25 (300 К) [5]
Намагниченность насыщения M_s, кА/м	510 (0 К) [5] 477 (300 К) [5]	143 (0 К) [5] 119 (300 К) [5]	557 (0 К) 398 (300 К) [5]	158 (0 К) [5] 135 (300 К) [5]
Первая константа анизотропии K_1, 10^3 Дж/м^3	—10,7 [7]	—3,5 [53] —2,5 [54]	—18,7 (77 К) —2,8 (300 К) [24]	—20,6 (77 К) [38] —6,3 (300 К) [38]
Вторая константа анизотропии K_2, 10^3 Дж/м^3	—2,8 [7]	—	—0,3 (77 К) —0,2 (300 К) [24]	—
Константа магнитострикции λ, 10^{-6}	77,6 [111] —19,5 [100], 57,1 [110, 8]	2,0 [111] —6(λ_s)[17] —10,6 [100, 59]	—1 [111] —5 (λ_s) [5] —35 [100] [14]	—15 (λ_s) [39]
Фактор спектроскопического расщепления g	2,03 (123 К) [9] 2,12 (294 К) [9]	2,03—2,06 (пк) [55]	2,019 (77 К) [24] 2,004 (300 К) [24]	2,20 (77 К) [39] 2,04 (300 К) [39]
Ширина линии ферромагнитного резонанса ΔH, кА/м	—	1,59 [53]	0,95 (423 К) [25] 1,03 (294 К) [26]	27,8 (пк) [41]
Относительная начальная магнитная проницаемость μ_H	70 (пк) [8]	36 (пк) [54]	250 [5]	70 [40]
Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$	—	$\varepsilon' = 9,66$ (4,55 ГГц) $\varepsilon'' = 0,17$ [42]	—	$\varepsilon' = 9,24$ (4,55 ГГц) (пк) [42] $\varepsilon'' = 0,52$
Удельное сопротивление ρ_0, 10^4 Ом · м	$5 \cdot 10^{-9}$ [10, 43]	~1 (T=373 К) [44]	$2 \cdot 10^{-3}$ [27] ($Mn_{1,16}Fe_{1,84}O_4$)	~1 (373 К) [44]

Параметр[*1]	$CoFe_2O_4$	$NiFe_2O_4$	$Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4$
Постоянная решетки a, нм	0,838 [17]	0,8337 [11, 13]	0,833 [28]
Распределение катионов	Fe[CoFe] [45]	Fe[NiFe] [12]	Fe[$Li_{0,5}Fe_{1,5}$] [28]
Кислородный параметр u	0,381 [45]	0,381 [60]	0,382 [28]
Рентгеновская плотность d_X, 10^3 кг/м^3	5,29 [45]	5,37 [13]	4,75 [28]
Температура Кюри T_C, К	793 [5]	858 [13]	943 [5]
Магнитный момент на молекулу p_m^0, μ_B	3,94 (0 К) [46]	2,3 (0 К) [5]	2,6 (0 К) [5]
Удельная намагниченность насыщения σ_s, А · м^2/кг	94 (0 К) [58]	56 (0 К) [58]	69 (0 К) [58]
	80 (300 К) [5]	50 (300 К) [5]	65 (300 К) [5]
Намагниченность насыщения M_s, кА/м	477 (0 К) [5]	302 (0 К) [5]	334 (0 К) [5]
	422 (300 К) [5]	255 (300 К) [61]	285 (300 К) [61]
Первая константа анизотропии K_1, 10^3 Дж/м^3	$4,4 \cdot 10^2$ (77 К) [15]	—8,7 (77 К) [14]	—12,7 (77 К) [29]
	$2,9 \cdot 10^2$ (300 К) [15]	—6,2 (300 К) [14]	—8,4 (300 К) [29]
Вторая константа анизотропии K_2, 10^3 Дж/м^3	—	—3 [16]	—9,7 (77 К) [30]
			—0,2 (300 К) [30]
Константа магнитострикции λ, 10^{-6}	120 [111] ($Co_{0,8}Fe_{2,2}O_4$) [15]	—4 [111] —26 (λ_s) [17]	2,7 [111] —8 (λ_s) [31]
	—590 [100]—110 (λ_s) [17]	—36 [100, 14]	—28,7 [100, 2]
Фактор спектроскопического расщепления g	2,7 (363 К) (мк) [48]	2,198 (85 К)	2,012 (77 К)
	2,22 (373 К) (пк) [49]	2,196 (298 К) [18]	2,003 (300 К) [30]
Ширина линии ферромагнитного резонанса ΔH, кА/м	—	0,75 [19]	0,06 (134 К)
		1,19 [20]	0,14 [32]
Относительная начальная магнитная проницаемость μ_H	25 (пк) [5]	80 (мк) [14]	33 (пк) [5]
		39 (пк) [21]	
Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$	$\varepsilon' = 10$ (4,55 ГГц, пк) [42]	19 (мк) 21 (пк) [14]	—
Удельное сопротивление ρ_0, 10^4 Ом · м	0,5 (373 К) [44]	2 [22]	$\sim 1 \cdot 10^{-4}$ [33]

[*1] Значения физических величин приведены, если не оговорено специально, для монокристаллов при температуре 293 К.

[*2] Структура медного феррита $CuFe_2O_4$ зависит от термообработки. При медленном охлаждении ниже температуры трансформации $T_{тр}$ происходит переход кубической структуры в тетрагональную. $T_{тр} = 1033$ К [36], 688 К [56] и 663 К [57]. В результате закаливания при $T > T_{тр}$ кубическая структура сохраняется при температуре 293 К.

Б. Смешанные ферриты

Таблица 29.2. **Результаты экспериментов по дифракции нейтронов в ряде образцов ферритов $Mg_xMn_{1-x}Fe_2O_4$** [11]

$T_{зак}$ — температура закалки; a — постоянная решетки; u — кислородный параметр

x	$T_{зак}$, К	a, нм	u	Доля ионов в тетраэдрических узлах	
				Mg^{2+}	Mn^{2+}
0,25	1673	0,8485	0,3850	0,12	0,89
0,25	1273	0,8479	0,3848	0,09	0,78
0,5	1673	0,8455	0,3839	0,18	0,92
0,5	1273	0,8450	0,3836	0,14	0,82
0,75	1673	0,8424	0,3834	0,24	0,90
0,75	1273	0,8421	0,3831	0,21	0,98
0,9	1673	0,8406	0,3831	0,25	1,00
0,9	1273	0,8403	0,3821	0,21	0,90

Таблица 29.3. **Зависимость некоторых параметров кобальтцинковых ферритов $Co_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ от содержания кобальта x** [62, 63]

T_C — температура Кюри; σ_s — удельная намагниченность насыщения

x	T_C, К	p_m^0, μ_B	σ_s, А·м^2/кг, при температуре T, К			
			285	77	20	0
0,2	298	4,06	18,5	62,0	72,6	95,0
0,3	355	4,90	39,3	91,0	95,5	114,0
0,4	410	5,78	61,0	119,2	126,0	132,0
0,6	548	6,03	87,5	128,5	133,2	143,0
0,8	662	4,87	93,7	110,0	110,0	115,5
0,9	733	4,29	90,0	93,9	94,1	102,0
1,0	788	3,67	83,6	83,0	82,6	87,5

Таблица 29.4. **Зависимость намагниченности насыщения M_S и фактора спектроскопического расщепления g для поликристаллического феррита $Co_{0,7}Zn_{0,3}Fe_2O_4$ от температуры**

Приведены также значения g-фактора и первой константы анизотропии K_1 для монокристалла того же состава. Температура Кюри $T_C = 613$ К. Измерения в интервале температур от 223 до 283 К проводились на частоте 23,6 ГГц, а в интервале от 293 до 553 К — на частоте 9,25 ГГц [64, 65]

T, К	Поликристалл		Монокристалл	
	M_S, кА/м	g	g	K_1, 10^4 Дж/м³
223	560	—	1,90	12,03
248	545	—	1,90	8,41
283	500	—	1,91	4,51
293	506	2,07	1,91	2,36
313	450	2,10	1,92	1,34
333	381	2,11	1,96	0,16
353	338	2,12	2,06	—0,21
393	269	2,15	2,12	—0,41
433	203	2,16	2,12	—0,34
473	134	2,17	2,17	—0,21
513	61	2,18	2,16	—0,07
553	8	2,19	2,15	—0,01

Таблица 29.5. **Зависимость некоторых параметров никелевых ферритов — алюминатов $NiFe_{2-x}Al_xO_4$ от содержания алюминия x** [66, 67]

a — постоянная решетки; T_C — температура Кюри; p_m^0 — магнитный момент на молекулу; g — фактор спектроскопического расщепления

x	a, нм	T_C, К	p_m^0, μ_B		g
			медленное охлаждение	закалка при 1623 К	
0,00	0,8337	580	2,29	2,29	2,3
0,25	0,83062	506	1,30	1,59	2,7
0,45	0,82769	465	0,61	1,19	—
0,50	0,82705	430	0,44	0,99	6,9
0,625	0,82521	360	0—0,045	—	3,8
0,75	0,82329	294	0,38	0,58	1,5
1,00	0,81951	198	0,64	0,42	—

Таблица 29.6. **Значения фактора спектроскопического расщепления g и магнитного момента на молекулу p_m^0 для феррита $LiFe_5O_8$ и его твердых растворов с $CdFe_2O_4$ и $LiAl_5O_8$** [68]

Состав	g ($T = 300$ К)	p_m^0, μ_B
$LiFe_5O_8$	1,96	2,38
$(LiFe_5O_8)_{0,75}(CdFe_2O_4)_{0,25}$	1,97	3,44
$(LiFe_5O_8)_{0,65}(CdFe_2O_4)_{0,35}$	1,96	4,10

Продолжение табл. 29.6

Состав	g ($T = 300$ К)	p_m^0, μ_B
$(LiFe_5O_8)_{0,50}(CdFe_2O_4)_{0,50}$	1,97	4,70
$(LiFe_5O_8)_{0,25}(CdFe_2O_4)_{0,75}$	1,99	4,53
$Li(Fe_{0,9}Al_{0,1})_5O_8$	1,97	1,99
$Li(Fe_{0,8}Al_{0,2})_5O_8$	1,99	0,62
$Li(Fe_{0,7}Al_{0,3})_5O_8$	2,01	0,10
$Li(Fe_{0,6}Al_{0,4})_5O_8$	—	0,13

Таблица 29.7. **Зависимость параметров литий-хромовых ферритов от содержания хрома** [69]

Содержание хрома x	Распределение ионов металлов	a, нм	T_C, К	$T_{комп}$, К	p_m^0, μ_B
0,0	$Fe_{1,00}[Li_{0,50}Fe_{1,50}]O_4$	0,8331	953	—	2,47—2,60
0,50	$Fe_{1,00}[Li_{0,50}Fe_{1,00}Cr_{0,50}]O_4$	0,8306	773	—	1,50—1,62
0,75	$Fe_{0,98}Li_{0,02}[Li_{0,48}Fe_{0,77}Cr_{0,75}]O_4$	0,8296	683	—	1,35
1,00	$Fe_{0,96}Li_{0,04}[Li_{0,44}Fe_{0,56}Cr_{1,00}]O_4$	0,8292	588	478	0,84
1,25	$Fe_{0,91}Li_{0,09}[Li_{0,41}Fe_{0,34}Cr_{1,25}]O_4$	0,8290	487	311	0,61
1,50	$Fe_{0,80}Li_{0,20}[Li_{0,30}Fe_{0,20}Cr_{1,50}]O_4$	0,8287	392	257	0,55
1,60	$Fe_{0,64}Li_{0,36}[Li_{0,14}Fe_{0,26}Cr_{1,60}]O_4$	0,8288	440	284	0,42
1,70	$Fe_{0,54}Li_{0,46}[Li_{0,14}Fe_{0,26}Cr_{1,70}]O_4$	0,8290	428	293	0,22
2,00	$Fe_{0,50}Li_{0,50}[Cr_{2,00}]O_4$	0,8288	353±16	310±15	—

Таблица 29.8. **Основные характеристики хромовых халькогенидных шпинелей**

Соединение	Параметр решетки, 10^{-1} нм	Тип магнитного упорядочения	Температура Кюри или Нееля, К	Магнитный момент μ_B / мол.	Край поглощения, мкм		Тип проводимости и удельное сопротивление ρ, Ом · м, при 300 К	Литература
					300 К	4,2 К		
$CdCr_2Se_4$	10,755	Ферромагнитное	130	5,98	0,94	1,08	Полупроводник p-типа, 10^2—10^3	[76, 77, 78—81]
$CdCr_2S_4$	10,244	»	85	5,9	0,79	0,69	То же n-типа, 10^4—10^6	[78, 79, 82—84]
$HgCr_2Se_4$	10,753	»	106	5,6	1,48	3,88	То же p-типа, $0{,}7 \cdot 10^{-2}$	[78, 85—88]
$HgCr_2S_4$	10,237	Антиферромагнитное	36	5,5	—	1,27	То же	[89, 90]
$ZnCr_2Se_4$	10,443	»	20	—	0,97	1,10	То же p-типа	[91, 92]

Таблица 29.9. **Магнитооптические параметры некоторых хромовых халькогенидных шпинелей**

Соединение	Фарадеевское вращение, град/см	Магнитооптическая добротность, град/дБ	Литература
$CdCr_2S_4$	$8{,}0 \cdot 10^3$ ($\lambda = 0{,}8$ мкм)	30 ($\lambda = 1$ мкм)	[93]
	$T = 80$ К, $H = 480$ кА/м		
$CdCr_2Se_4$	$9{,}2 \cdot 10^3$ ($\lambda = 1{,}17$ мкм)	63 ($\lambda = 1{,}3$ мкм)	[94]
	$T = 82$ К, $H = 1200$ кА/м		

Продолжение табл. 29.9

Соединение	Фарадеевское вращение, град/см	Магнитооптическая добротность, град/дБ	Литература
$HgCr_2Se_4$	10^3	4,5	[95]
	$T = 85$ К, $H = 360$ кА/м, $\lambda = 10{,}6$ мкм		
$CoCr_2S_4$	$1{,}3 \cdot 10^6$ ($\lambda = 1$ мкм, $T = 80$ К) (вычислено из эффекта Керра)	—	[96]

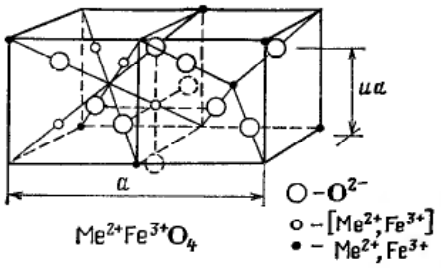


Рис. 29.1. Два октанта шпинельной структуры. Большими светлыми кружками обозначены ионы кислорода, малыми светлыми и черными кружками — ионы металла в октаэдрических и тетраэдрических позициях соответственно [5]

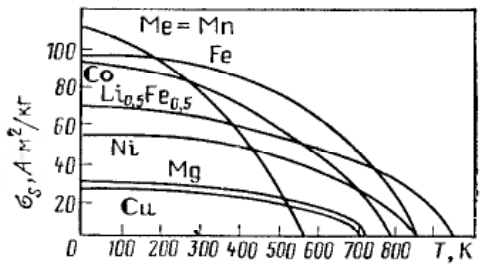


Рис. 29.2. Зависимость удельной намагниченности насыщения σ_s для некоторых простых ферритов-шпинелей от температуры [5]

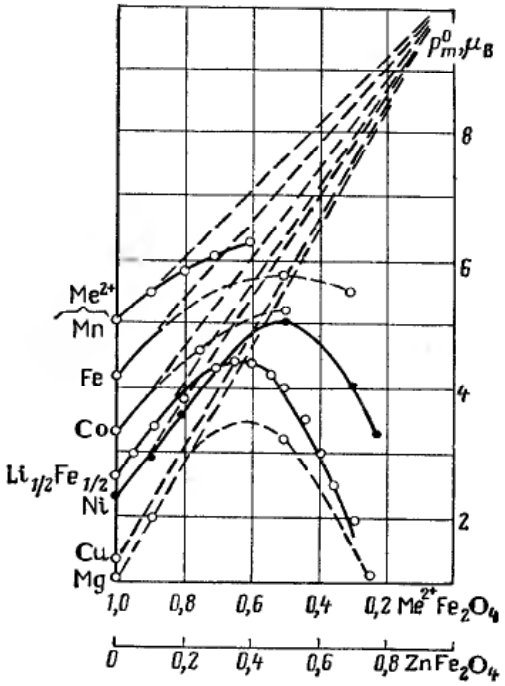


Рис. 29.3. Магнитные моменты насыщения p_m^0 при 0 К некоторых смешанных ферритов, полученных замещением магнитных ионов двухвалентного металла Me^{2+} немагнитными ионами цинка (Me^{2+} — один из ионов Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Mg или $Li_{0,5}$ $Fe_{0,5}$) [37]

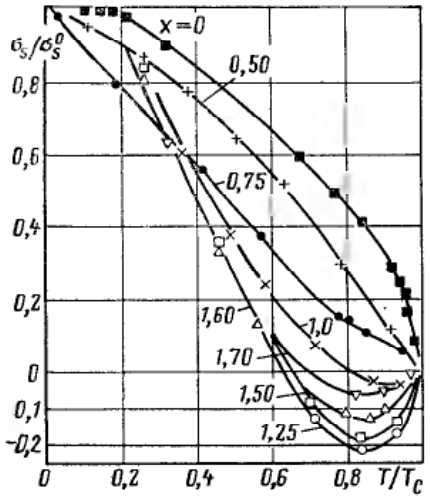


Рис. 29.4. Зависимость относительной намагниченности насыщенных σ_s/σ_s^0 от приведенной температуры T/T_C для литиевых ферритов-хромитов $Li_{0,5}Fe_{2,5-x}Cr_xO_4$ [70]

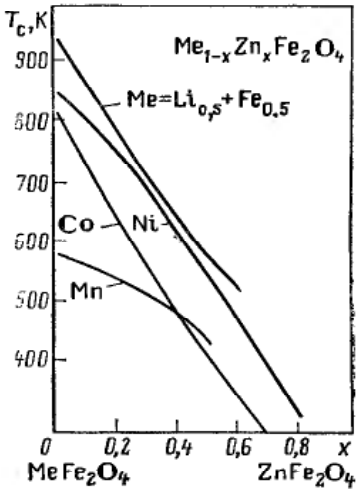


Рис. 29.5. Зависимость точки Кюри T_C некоторых смешанных ферритов типа $Me_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ от концентрации цинка [5]

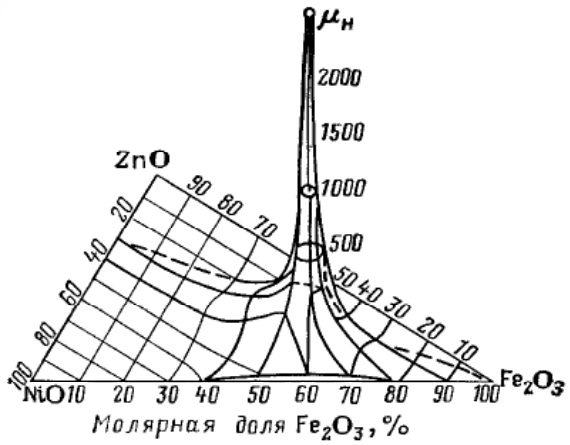


Рис. 29.6. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_H ферритов в системе Ni—ZnO—Fe_2O_3 от их состава [71]

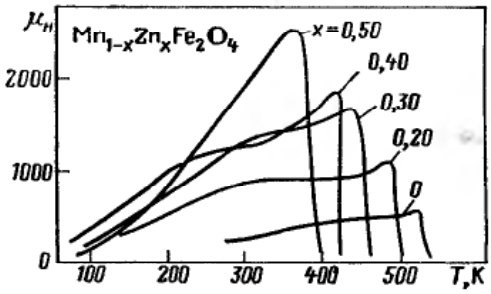


Рис. 29.7. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_H смешанных марганец-цинковых ферритов от температуры [5]

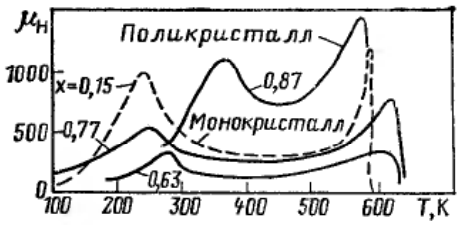


Рис. 29.8. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_H от температуры для ферритов $Mn_{1-x}Fe^{2+}_xFe_2O_4$ [72]

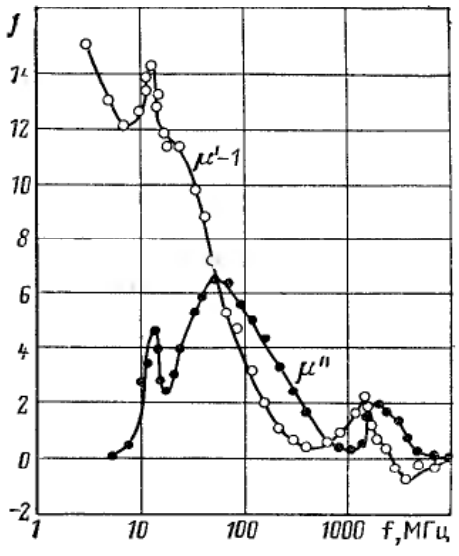


Рис. 29.9. Зависимость вещественной μ' и мнимой μ'' частей начальной магнитной проницаемости от частоты для поликристаллического феррита $(MgO)_{0,81}(FeO)_{0,19}Fe_2O_3$ при температуре 293 К [54]; $d=3{,}68\cdot10^3$ кг/м^3; σ_s(299 К) = 26,4 А·м^2/кг

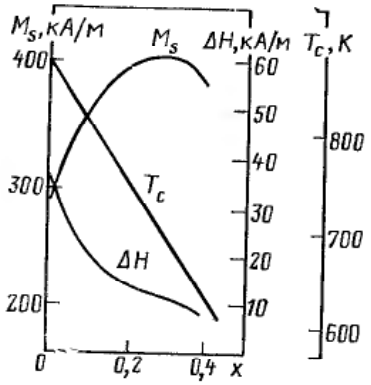


Рис. 29.10. Зависимость намагниченности насыщения M_s, ширины линии ФМР ΔH (10 ГГц) при температуре 293 К и температуры Кюри T_C литиевых ферритов состава $Li_{0,5-x/2}Zn_xFe_{2,5-x/2}O_4$ от x [61]

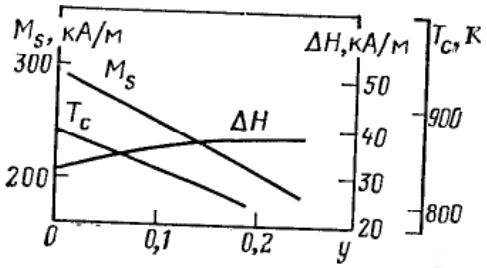


Рис. 29.11. Зависимость намагниченности насыщения, ширины линии ФМР ΔH (10 ГГц) при температуре 293 К и температуры Кюри T_C литиевого феррита состава $Li_{0,5+y/2}Fe_{2,5-3y/2}Ti_yO_4$ (с добавками ионов Мп и Bi) от y [61]

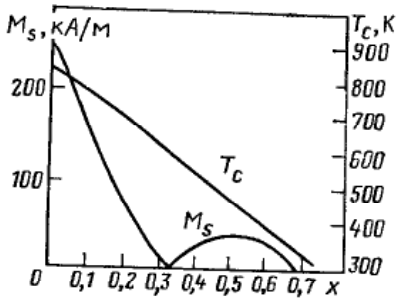


Рис. 29.12. Зависимость намагниченности насыщения при комнатной температуре и температуры Кюри никелевого феррита состава $NiFe_{2-2x}Al_{2x}O_4$ от x. (Образцы были тщательно отожжены [61].)

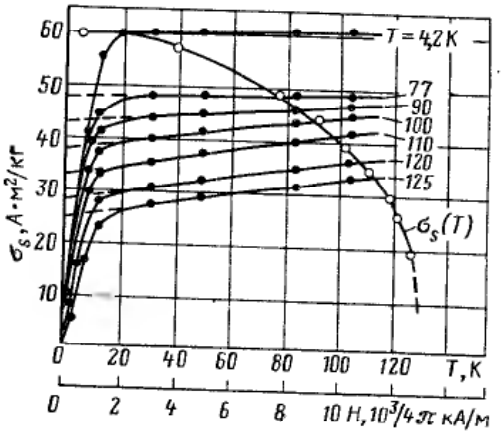


Рис. 29.13. Зависимости спонтанной удельной намагниченности от внешнего магнитного поля при различной температуре и от температуры σ_s (T) в $CdCr_2Se_4$ [76]

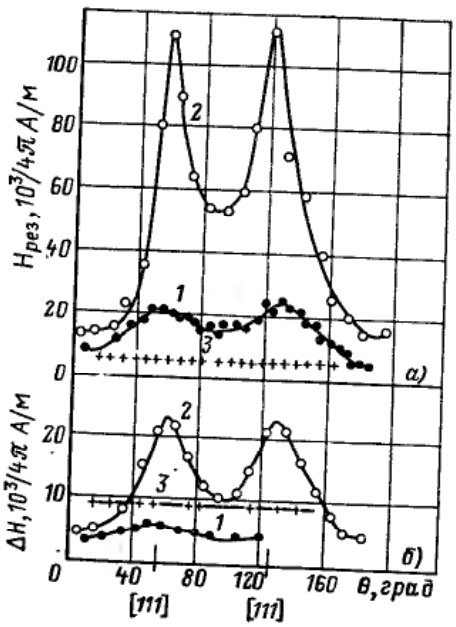


Рис. 29.14. Угловые зависимости резонансного поля (*а*) и ширины резонансной кривой (*б*) сферы из $CdCr_2Se_4$ [76]:
T=4,2 К; θ — угол между линиями постоянного магнитного поля и осью [100]; *1* — кристалл, выращенный методом кристаллизации из квазиоднородного расплава; *2* — кристалл, выращенный методом переноса в жидкой фазе; *3* — кристалл, выращенный методом кристаллизации из квазиоднородного расплава, с молярной примесью Ag 0,08%

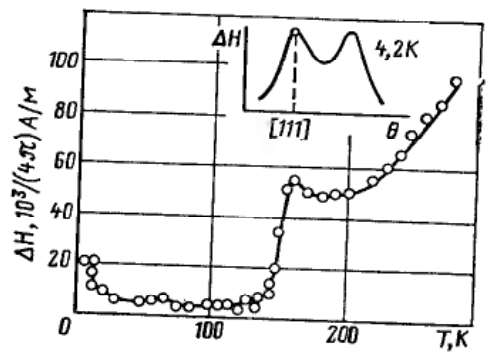


Рис. 29.15. Температурная зависимость ширины резонансной кривой сферы из $CdCr_2Se_4$ [76]:
T=4,2 К; f=8,9 ГГц; постоянное магнитное поле направлено по оси [111]

→

Рис. 29.18. Зависимость удельного сопротивления монокристаллов Cd_{1-x} In_x Cr_2Se_4 *n*-типа от температуры [80] при различных значениях *x* →

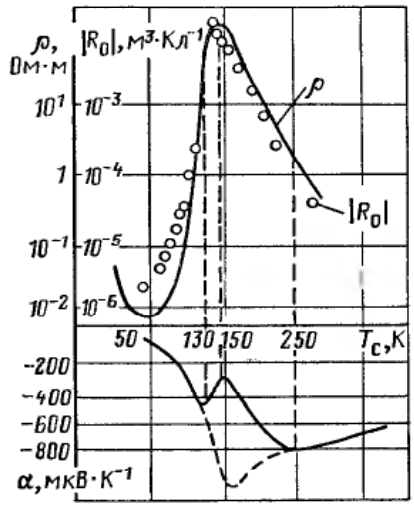


Рис. 29.16. Температурная зависимость удельного электросопротивления ρ, нормального коэффициента Холла R_0 и коэффициента термо-ЭДС α для образца $CdCr_2Se_4$ (примесь — 1% In) [77]:
——— — зависимость, полученная экспериментально;
– – – – расчет по однозонной модели

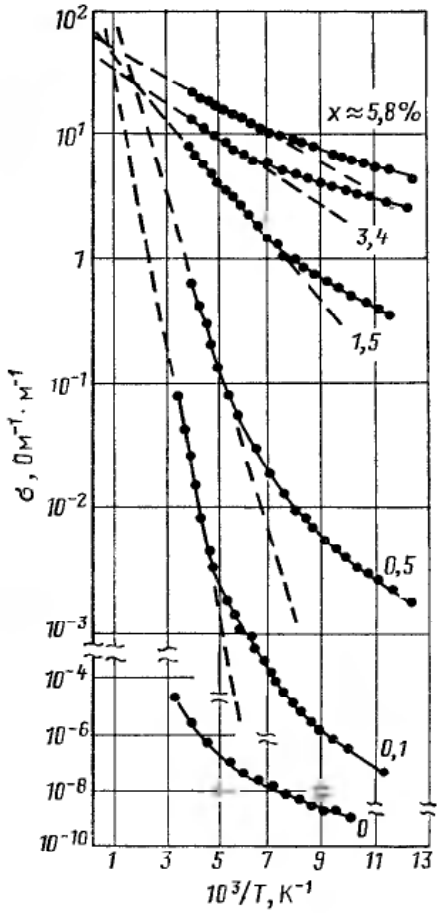
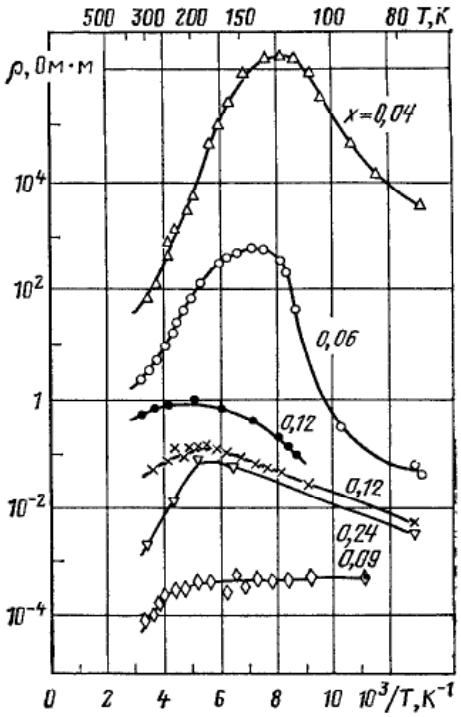
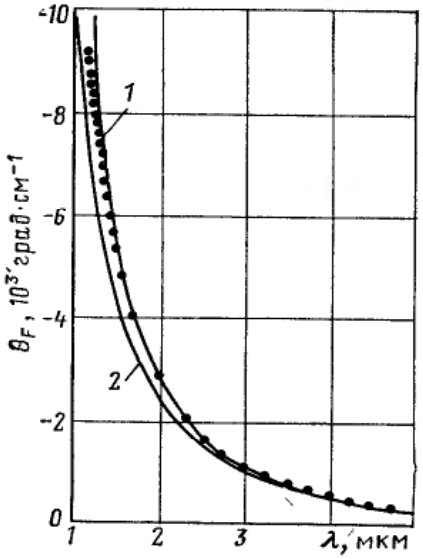


Рис. 29.17. Зависимость удельной проводимости монокристаллов $Cd_{1-x}Ag_x$ Cr_2Se_4 *p*-типа от температуры при различных значениях *x* [78]. Данные по электропроводности чистого кристалла (кривая $x=0$) взяты из [79]





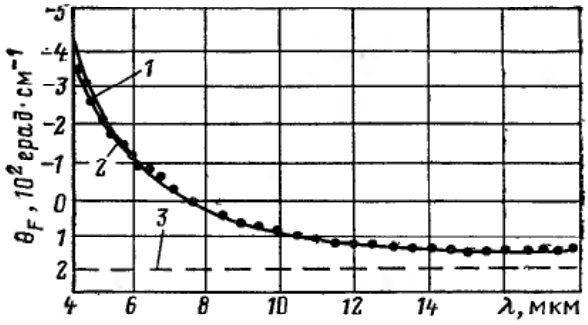


Рис. 29.19. Спектральная зависимость фарадеевского вращения в $CdCr_2Se_4$ при $T=82$ К, $H=1{,}2\cdot10^3$ кА/м [81] (точки — экспериментальные значения, линии — расчетные зависимости):
1 — соответствующая резонансной длине волны; *2* — квадратичному закону; *3* — постоянный вклад от ФМР

29.3. ФЕРРИТЫ СО СТРУКТУРОЙ ГРАНАТА

Кристаллографическая структура. Ферримагнитные оксиды типа граната кристаллизуются в структуре, изоморфной классическому минералу гранату $\{Ca_3\}[Al_2](Si_3)O_{12}$. Структура граната описывается кубической пространственной группой $Ia3d - O_h^{10}$. Элемент структуры показан на рис. 29.20. Кубическая элементарная ячейка граната содержит восемь формульных единиц. Шестнадцать ионов Al^{3+} занимают октаэдрические позиции, обозначаемые 16*a*, двадцать четыре иона Si^{4+} занимают позиции в центрах тетраэдров, обозначаемые 24*d*, и двадцать четыре иона Ca^{2+} находятся в окружении из восьми ионов кислорода, и их позиции обозначаются 24*c*.

Интерес к структуре граната значительно возрос после синтеза ферримагнитных гранатов типа $M_3Fe_5O_{12}$, где M — ион редкоземельного металла или иттрия.

Магнитные свойства и намагниченность насыщения. В гранатах в отличие от ферритов со структурой шпинеля были введены в рассмотрение три магнитные подрешетки. Наиболее сильное антиферромагнитное взаимодействие, определяющее температуру Кюри T_C, осуществляется между ионами трехвалентного железа в октаэдрической 16*a*- и тетраэдрической 24*d*-подрешетках. Подрешетка редкоземельных ионов 24*c* наиболее сильно связана отрицательным обменным взаимодействием с тетраэдрической подрешеткой (в гранатах с легкими редкоземельными ионами от Pr до Sm — октаэдрической подрешеткой), причем эта связь примерно в 10 раз слабее, чем $(a-d)$- взаимодействие. Намагниченность насыщения M_s в случае тяжелых редкоземельных гранатов может быть записана через намагниченности отдельных подрешеток следующим образом:

$$M_s = M_{24d} - M_{16a} - M_{24c}. \qquad (29.11)$$

Ферромагнитный резонанс и анизотропия. Ферриты-гранаты имеют меньшую удельную намагниченность, чем ферриты-шпинели, и большой интерес к ним был вызван в основном их уникальными свойствами в СВЧ-диапазоне. Минимальные значения ширины линии ферромагнитного резонанса $\Delta H \simeq 16$ А/м (0,2 Э) были получены в иттриевом феррите-гранате, свободном от примесей редкоземельных ионов.

Для теоретической интерпретации результатов по ферромагнитному резонансу и анизотропии редкоземельных ферритов-гранатов необходим одновременный учет расщепления уровней ионов под действием кристаллического поля, спин-орбитального и обменного взаимодействий, которые подчас являются величинами одного порядка. В настоящее время информация об электронных уровнях ионов редкоземельных элементов еще недостаточна для надежной теоретической интерпретации результатов.

Магнитострикция. Магнитострикция редкоземельных ферритов-гранатов линейно связана с концентрацией редкоземельных ионов и сильно возрастает при понижении температуры. Рекордные звачения $\lambda_{111} = 2420 \cdot 10^{-6}$ и $\lambda_{100} = 1200 \cdot 10^{-6}$ в поле напряженностью $H = 2000$ кА/м при температуре 4,2 К были получены в тербиевом феррите-гранате, что сравнимо по порядку с магнитострикцией редкоземельных металлов.

Свойства ферритов со структурой граната приведены в табл. 29.10—21.31 и на рис. 29.20—29.30.

Таблица 29.10 **Структура граната [111]**

Пространственная группа	$Ia\,3d - O_h^{10}$			
Типичная идеальная формула	$\{Ca_3\}$	$[Al_2]$	(Si_3)	O_{12}
Позиция пространственной группы	24*c*	16*a*	24*d*	96*h*
Координаты	$0\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{8}$	000	$0\ \frac{1}{4}\ \frac{3}{8}$	*x y z*

Продолжение табл. 29.10

Пространственная группа	$Ia\,3d - O_h^{10}$			
Точечная симметрия (локальная)	222	$\bar{3}$	$\bar{4}$	1
Кислородная координация	8	6	4	—
Тип полиэдра	Додекаэдр (искаженный куб)	Октаэдр	Тетраэдр	—

Таблица 29.11. **Уточнения кристаллической структуры граната $Y_3Fe_5O_{12}$ [112—115]**

Постоянная решётки $a = 12{,}376$, 10^{-1} нм

x	*y*	*z*
— 0,0274 (9)	0,0572 (9)	0,1495 (9)
— 0,0270 (4)	0,0569 (5)	0,1505 (5)
— 0,0271 (1)	0,0567 (1)	0,1504 (1)

Межатомные расстояния до ближайших соседей

Ион	Расстояние, 10^{-1} нм		Ион	Расстояние, 10^{-1} нм
O^{2-}	$2Y^{3+}$ 2,357 (1)	2,436 (1)	Fe^{3+} [*a*]	3,46
	2,017 (1)	—	—	3,46
	1,865 (1)	—	—	2,017
	2·2,692 (2	2,789 (2)	Fe^{3+} (*d*)	2·3,09
	2,837 (2)	2,976 (2)		3,46
	2·3,005 (2)	2·3,146 (2)		1,865 (1)
Y^{3+}	3,46 —	—		
	2·3,09 —	4·3,79		
	4·2,357 (1)	2·2,436 (1)		

Межатомные углы

Конфигурация	Угол, град
Fe^{3+} [*a*] — O^{2-} — Fe^{3+} (*d*)	125,9 (1)
Fe^{3+} [*a*] — O^{2-} — Y^{3+} *1	101,5 (1)
Fe^{3+} [*a*] — O^{2-} — Y^{3+} *2	104,3 (1)
Fe^{3+} (*d*) — O^{2-} — Y^{3+} *1	123,0 (1)
Fe^{3+} (*d*) — O^{2-} — Y^{3+} *2	93,5 (1)
Y^{3+} — O^{2-} — Y^{3+}	104,5 (1)
Fe^{3+} [*a*] — O^{2-} — Fe^{3+} [*a*] (4,41)*3	147,2
Fe^{3+} (*d*) — O^{2-} — Fe^{3+} (*d*) (3,41)*3	86,6
Fe^{3+} (*d*) — O^{2-} — Fe^{3+} (*d*) (3,68)*3	78,8
Fe^{3+} (*d*) — O^{2-} — Fe^{3+} (*d*) (3,83)*3	74,7
Fe^{3+} (*d*) — O^{2-} — Fe^{3+} (*d*) (3,83)*3	74,6

*1 Y^{3+} — O^{2-}, расстояние $2{,}436 \cdot 10^{-1}$ нм.
*2 Такая же связь, расстояние $2{,}357 \cdot 10^{-1}$ нм.
*3 Значения в скобках — наибольшие расстояния Fe^{3+} (*a* или *d*) — O^{2-} в единицах 10^{-1} нм.

Таблица 29.12. **Ионный радиус R^{3+} (координация 8), параметр элементарной ячейки *a* и рентгеновская плотность d_X ферритов-гранатов $R_3Fe_5O_{12}$ [116—117]**

Феррит-гранат	Ионный радиус R^{3+}, 10^{-1} нм	*a*, 10^{-1} нм	d_X, г/см³
$La_3Fe_5O_{12}$	1,190	(12,767)*1	(5,67)*1
$Pr_3Fe_5O_{12}$	1,137	(12,646)*1	(5,87)*1
$Nd_3Fe_5O_{12}$	1,120	(12,600)*1	(6,00)*1
$Sm_3Fe_5O_{12}$	1,087	12,529	6,23
$Eu_3Fe_5O_{12}$	1,073	12,498	6,31
$Gd_3Fe_5O_{12}$	1,061	12,471	6,46

*1 Аппроксимированное значение.

Продолжение табл. 29.12

Феррит-гранат	Ионный радиус R^{3+}, 10^{-1} нм	*a*, 10^{-1} нм	d_X, г/см³
$Tb_3Fe_5O_{12}$	1,044	12,436	6,55
$Dy_3Fe_5O_{12}$	1,030	12,405	6,61
$Y_3Fe_5O_{12}$	1,016	12,376	5,17
$Ho_3Fe_5O_{12}$	1,017	12,375	6,77
$Er_3Fe_5O_{12}$	1,004	12,347	6,87
$Tm_3Fe_5O_{12}$	0,991	12,323	6,94
$Yb_3Fe_5O_{12}$	0,982	12,302	7,06
$Lu_3Fe_5O_{12}$	0,972	12,283	7,14

Таблица 29.13. **Межионные расстояния, 10^{-1} нм, до ближайших соседей при 673 К из данных по дифракции нейтронов [118]**

Составляющие граната	Гранат					
	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
$R^{3+} - O^{2-}$	2,371 (7)	2,360 (11)	2,362 (5)	2,351 (10)	2,340 (15)	2,336 (6)
$R^{3+} - O^{2-}$	2,464 (7)	2,441 (11)	2,436 (5)	2,415 (10)	2,424 (15)	2,410 (6)
Fe^{3+} [a] — O^{2-}	2,025 (12)	2,030 (15)	2,018 (9)	2,019 (12)	2,007 (16)	2,025 (8)
Fe^{3+} (d) — O^{2-}	1,862 (12)	1,864 (12)	1,860 (9)	1,868 (12)	1,863 (18)	1,850 (9)

Примечание. В скобках указана погрешность в последней цифре.

Таблица 29.14. **Вхождение различных ионов в $Y_3Fe_5O_{12}$**

Ионные радиусы $R_и$ (10^{-1} нм), x_{max} — максимальное вхождение на формульную единицу, предпочтение для различных кристаллографических позиций [119]

Тетраэдрические d-позиции				Октаэдрические a-позиции				Додекаэдрические c-позиции			
Ион	$R_и$	x_{max}	a^*	Ион	$R_и$	x_{max}	a^*	Ион	$R_и$	x_{max}	a^*
Fe^{3+}	0,492	3	—	Fe^{3+}	0,642	2		Y^{3+}	1,016	3	—
B^{3+}	0,11(?)	?	—					(Mg^{2+})	0,89	?	Si^{4+}
Si^{4+}	0,26	3	Ca^{2+}					Mn^{2+}	0,96	?	Ge^{4+}
Be^{2+}	0,27	>0,1(?)	Fe^{4+}					Lu^{3+}	0,972	3	—
V^{5+}	0,355	1,5	Ca^{2+}	Mn^{4+}	0,530	?		Yb^{3+}	0,982	3	—
Ge^{4+}	0,390	<3	Ca^{2+}	(Ge^{4+})	0,530	?	Ca^{2+}				
Al^{3+}	0,390	3	—	(Al^{3+})	0,539	2	—				
				(Te^{6+})	0,56	0,25	Ca^{2+}				
(Ti^{4+})	0,42	≈0,2	Ca^{2+}	Ti^{4+}	0,582	≈0,5	Ca^{2+}	Tb^{3+}	1,044	3	—
Ga^{3+}	0,470	3	—	(Ga^{3+})	0,610	2	—	Gd^{3+}	1,061	3	—
(Sn^{4+})	0,55	<1,0	Ca^{2+}	Sn^{4+}	0,708	2	Ca^{2+}	Eu^{3+}	1,073	3	—
(Co^{2+})	0,58	≈0,5	Ge^{4+}	Co^{2+}	0,745	2	Ge^{4+}	Sm^{3+}	1,087	3	—
Fe^{4+}	(0,585)	0,1	Ca^{2+}	Sb^{5+}	0,616	2	Ca^{2+}, Na^{+}	Th^{4+}	1,095	≈0,9	Ca^{2+}
				Cr^{3+}	0,615	≈0,6	—	Cd^{2+}	1,10	3	Ge^{4+}
(Zn^{2+})	0,60	0,7	F^-	Zn^{2+}	0,740	2	Ge^{4+}	Nd^{3+}	1,120	≈1,8	—
(Ir^{4+})	0,625	?	(Fe^{2+})	Ir^{4+}	0,625	>0,05 (?)	Ca^{2+}, Mg^{2+}	Ca^{2+}	1,124	3	V^{5+}
				Mn^{3+}	0,645	≈0,65 (?)	—	Bi^{3+}	1,132	1,2—1,9	—
Fe^{2+}	0,63	1	F^-	Fe^{2+}	0,730	≈0,45	Si^{4+}	Pr^{3+}	1,137	≈1,1	—
(Ru^{3+})	0,68	?	—	Ru^{3+}	0,680	>0,02 (?)	—	Ce^{3+}	1,143	≈0,13?	—
				Ni^{2+}	0,690	≈1,5	Ge^{4+}	Na^{+}	1,18	3	Te^{6+}
				Hf^{4+}	0,710	2	Ca^{2+}	La^{3+}	1,190	0,45	—
				Mg^{2+}	0,720	≈1,8	Si^{4+}	Sr^{2+}	1,240	≈1,0	Sn^{4+}
				Cu^{2+}	0,730	<0,2 (?)	Ge^{2+}	Pb^{2+}	1,29	1 (?)	Ge^{4+}
				Zr^{4+}	0,745	2	Ca^{2+}				
				Sc^{3+}	0,745	≈1,5—1,6	—				
				In^{3+}	0,792	≈0,9—1,0	—				
				Mn^{2+}	0,830	≈0,4	Si^{4+}				

Примечание. a^* — ионы, непользуемые для компенсации заряда.

Таблица 29.15. **Температура Кюри, температура компенсации [119] и намагниченность насыщения [120] редкоземельных ферритов-гранатов при температуре 295 К**

Гранат	T_C, К	$T_{комп}$, К	M_0, $10^3/(4\pi)$ А/м
$Y_3Fe_5O_{12}$	558,9	—	1750
$Sm_3Fe_5O_{12}$	573,4	—	1675
$Eu_3Fe_5O_{12}$	562,4	—	1170
$Gd_3Fe_5O_{12}$	566	285,5	56
$Tb_3Fe_5O_{12}$	568	248,6	198
$Dy_3Fe_5O_{12}$	553	230,2	376
$Ho_3Fe_5O_{12}$	553	132,2	880
$Er_3Fe_5O_{12}$	566	83	1240
$Tu_3Fe_5O_{12}$	548	7,6	1397
$Yb_3Fe_5O_{12}$	549	<20	1555
$Lu_3Fe_5O_{12}$	529,7	—	1815

Таблица 29.16. **Значения констант анизотропии различных редкоземельных ферритов-гранатов [119]**

Феррит-гранат	T, К	K_1, 10^4 Дж/м³	K_2, 10^4 Дж/м
$Y_3Fe_5O_{12}$	295	—5,7÷—6,3	—2,3
	273	—7,8	—0,26
	77	—22,1	—2,1
	4,2	—24,8	—2,3
	4,2	—26,3	—1,2

Продолжение табл. 29.1

Феррит-гранат	T, К	K_1, 10^4 Дж/м³	K_2, 10^4 Дж/м³
$Sm_3Fe_5O_{12}$	300	—17÷ —18,2	—
	77	—1430	2100
	4,2	—4000	—
$Eu_3Fe_5O_{12}$	293	—38	—
	4,2	—400	—156
$Gd_3Fe_5O_{12}$	320	—4,1	—1,0
	80	—44	—3,5
	4,2	—241	—3,7
$Tb_3Fe_5O_{12}$	300	—8,2	—
	80	—760	—7600
	78	+480	—4900
$Dy_3Fe_5O_{12}$	300	< —5	—
	80	—970	214
$Ho_3Fe_5O_{12}$	300	<—5	—
	80	—800	—270
	4,2	—30000	—
$Er_3Fe_5O_{12}$	300	—6,0	—
	110	—22,0	—
	77	36 (+45)	—
	4,2	9000	50 000
$Tm_3Fe_5O_{12}$	293	—5,8(—11)	0
	77	—29,8(—210)	100
$Yb_3Fe_5O_{12}$	300	—6,1	—
	80	—38,5	—
	4,2	—6700	—

Таблица 29.17. **Поля и константы магнитной кристаллографической анизотропии Bi—Ca—V ферритов-гранатов при температуре 20° С**

Феррит-гранат	M_0	K_1/M_0	K_2/M_0	K_1	K_2	Литература
	$10^3/(4\pi)$ А/м	$10^3/(4\pi)$ А/м		10^2 Дж/м³		
$Bi_{0,8}Ca_{2,2}Fe_{3,9}V_{1,1}O_{12}$	180	—240	—5	—3,44	—0,07	[121]
$Bi_{0,5}Ca_{2,5}Fe_{3,75}V_{1,25}O_{12}$	400	—50	—4	—1,59	—0,1	[121]
$Bi_{0,2}Ca_{2,8}Fe_{3,6}V_{1,4}O_{12}$	630	—22	—2	—1,10	—0,1	[121]
$Ca_3Fe_{3,5}V_{1,5}O_{12}$	750	—16	—1	0,96	—0,06	[122]
$Bi_{0,4}Ca_{2,6}Fe_{3,6}V_{1,3}In_{0,1}O_{12}$	330	—38	—2	—1,0	—0,05	[122]
$Bi_{0,4}Ca_{2,6}Fe_{3,45}V_{1,3}In_{0,25}O_{12}$	80	—55	—4	—0,35	—0,02	[122]
$Bi_{0,2}Ca_{2,8}Fe_{3,5}V_{1,4}Sc_{0,1}O_{12}$	470	—28	—2	—1,05	—0,07	[122]
$Bi_{0,2}Ca_{2,8}Fe_{3,35}V_{1,4}Sc_{0,25}O_{12}$	230	—25	—3	—0,46	—0,05	[122]
$Ca_3Fe_{3,4}V_{1,5}Sc_{0,1}O_{12}$	600	—16	—1	—0,76	—0.05	[122]
$Ca_3Fe_{3,25}V_{1,5}Sc_{0,25}O_{12}$	380	—14	—2	—0,42	—0,06	[122]
$Ca_3Fe_{3,1}V_{1,5}Sc_{0,4}O_{12}$	150	—10	—4	—0,12	—0,05	[122]

Таблица 29.18. Значения магнитоупругих и магнитострикционных коэффициентов некоторых ферритов-гранатов

Феррит-гранат	B_1, 10^5 Дж/м³		B_2, 10^5 Дж/м³		λ_{100}, 10^{-6}		λ_{111}, 10^{-6}		Литература
	300 К	77 К	300 К	77 К	300 К	77 К	300 К	77 К	
$Y_3Fe_5O_{12}$	3,4	1,7	6,4	12,7	—1,4	—0,7	—2,4	—5,3	[123]
$Y_3Fe_{4,8}Ga_{0,2}O_{12}$	3,0	2,6	6,0	12,5	—1,15	—1,0	—2,1	—4,3	[124]
$Y_3Fe_{4,2}Ga_{0,8}O_{12}$	2,2	2,6	2,86	6,0	—0,85	—1,0	—1,0	—2,1	[124]
$Y_3Fe_{3,66}Ga_{1,34}O_{12}$	0,4	1,75	0,57	2,36	—0,15	—0,67	—0,2	—0,82	[124]
$Y_3Fe_{4,81}Al_{0,19}O_{12}$	—	—	—	—	—0,2	—1,45	—3,45	—6,1	[125]
$Y_3Fe_{4,25}Al_{0,75}O_{12}$	—	—	—	—	—1,2	—2,2	—2,0	—4,8	[125]
$Y_3Fe_{4,52}Sc_{0,48}O_{12}$	2,3	—4,55	4,0	8,9	—0,91	1,75	—1,4	—3,2	[125]
$Y_3Fe_{4,3}Sc_{0,7}O_{12}$	1,2	—5,5	1,9	4,2	—0,45	2,1	—0,67	—1,45	[125]
$Bi_{0,5}Ca_{2,5}Fe_{3,75}V_{1,25}O_{12}$	4,4	7,6	2,0	3,7	—2,6	—4,5	—1,2	—2,5	[126]
$Gd_3Fe_5O_{12}$	—	—	—	—	0	7,1	—3,1	—3,9	[127]

Таблица 29.19. **Поля и константы магнитной кристаллографической анизотропии иттриевых ферритов-гранатов при температуре 20° С [121—129]**

Феррит-гранат	M_0, $10^3/(4\pi)$ А/м	K_1/M_0	K_2/M_0	K_1	K_2
		$10^3/(4\pi)$ А/м		10^2 Дж/м³	
$Y_3Fe_5O_{12}$	1750	—42	0	6,0	0
$Y_3Ga_{0,4}Fe_{4,6}O_{12}$	1150	—42	0	3,94	0
$Y_3Ga_{0,6}Fe_{4,4}O_{12}$	850	—45	0	3,05	0
$Y_3Ga_{0,8}Fe_{4,2}O_{12}$	600	—53	0	2,53	0
$Y_3Ga_{1,0}Fe_{4,0}O_{12}$	300	—62	0	1,48	0
$Y_3Ga_{1,2}Fe_{3,8}O_{12}$	100	—96	0	0,76	0
$Y_3In_{0,2}Fe_{4,8}O_{12}$	1850	—22	0	3,24	0
$Y_3In_{0,4}Fe_{4,6}O_{12}$	1820	—12	—1	1,74	0,1
$Y_3In_{0,55}Fe_{4,45}O_{12}$	1750	—7	—1	0,97	0,1
$Y_3Ga_{0,6}In_{0,15}Fe_{4,25}O_{12}$	900	—21	0	1,50	0
$Y_3Ga_{0,6}In_{0,3}Fe_{4,1}O_{12}$	930	—16	—1	1,18	0,05
$Y_3Ga_{0,6}In_{0,48}Fe_{3,92}O_{12}$	950	—5	—1	0,38	0,06
$Y_3Ga_{0,9}In_{0,15}Fe_{3,95}O_{12}$	460	—23	—1	0,84	0,03
$Y_3Ga_{0,9}In_{0,3}Fe_{3,8}O_{12}$	500	—18	—2	0,72	0,05
$Y_3Ga_{0,9}In_{0,48}Fe_{3,62}O_{12}$	570	—6	—2	0,27	0,07
$Y_3Ga_{1,1}In_{0,3}Fe_{3,6}O_{12}$	300	—24	—2	0,57	0,04
$Y_3Ga_{1,1}In_{0,48}Fe_{3,42}O_{12}$	420	—10	—2	0,33	0,06
$Y_3Fe_{4,995}Co_{0,005}O_{12}$	1750	—20	—10	—2,79	—1,39
$Y_3Fe_{4,99}Co_{0,01}O_{12}$	1750	5	—23	0,70	—3,20
$Y_3Fe_{4,97}Co_{0,03}O_{12}$	1750	105	—63	14,63	—8,78
$Y_3Fe_{4,98}Si_{0,02}O_{12}$	1750	—32	—4	—4,46	—0,56
$Y_3Fe_{4,95}Si_{0,05}O_{12}$	1700	—16	—8	—2,17	—1,08

Таблица 29.20. **Степенной закон для температурной зависимости намагниченности подрешеток $M_i\ (T)/M_i\ (0\text{K}) = D\,(1 - T/T_C)^{\beta}$ значения параметров D и β для $Y_3Fe_5O_{12}$ [130—131]**

Кристаллографическая позиция	β	D	Температурный интервал
[a]	0,323±0,005	1,18±0,02	$0{,}65 \leqslant T/T_C \leqslant 0{,}97$
Октаэдр	0,40±0,03	1,55±0,20	$0{,}97 \leqslant T/T_C \leqslant 0{,}9985$
(d)	0,349±0,005	1,09±0,02	$0{,}65 \leqslant T/T_C \leqslant 0{,}99$
Тетраэдр	0,47±0,03	1,95±0,20	$0{,}99 \leqslant T/T_C \leqslant 0{,}9997$

Таблица 29.21. **Коэффициенты упругой жесткости кристаллов, 10^{10} Па (10^{11} дин/см²), при температуре 300 К**

Феррит-гранат	c_{11}	c_{12}	c_{44}	Литература
$Y_3Fe_5O_{12}$	26,90	10,77	7,64	[132]
$Eu_3Fe_5O_{12}$	25,10	10,70	7,62	[133]
$Y_3Ga_5O_{12}$	29,03	11,73	9,55	[134]
$Y_3Al_5O_{12}$	33,40	11,12	11,51	[135]
$Y_3Fe_{2,66}Ga_{2,34}O_{12}$	28,47	11,81	8,36	[136]

Таблица 29.22. **Кубические коэффициенты упругой жесткости, 10^{10} Н/м², гранатов, не содержащих железа, при температуре 20 °С**

Гранат	c_{11}	c_{44}	c_{12}	A_I*1	Литература
$Y_3Al_5O_{12}$	33,32—33,40	11,50—11,51	11,07—11,12	1,033	[139]
$Y_3Ga_5O_{12}$	29,03	9,547	11,73	1,10	[136]
$Gd_3Ga_5O_{12}$	28,703	9,04	11,601	1,057	[137]
$Gd_3Ga_5O_{12}$ [100]	28,57	9,02	11,49	1,056	[138]
$Gd_3Ga_5O_{12}$ [110]	28,59	9,03	11,49	1,056	[138]
$Gd_3Ga_5O_{12}$ [$\bar{1}$10]	28,51	9,02	11,45	1,057	[138]
$Sm_3Ga_5O_{12}$	28,076	8,604	11,352	1,029	[140]
$Nd_3Ga_5O_{12}$	27,781	8,381	11,155	1,008	[141]

*1 $A_I = 2c_{44}/(c_{11} - c_{12})$ — коэффициент упругой анизотропии.

Таблица 29.23. **Средние значения микротвердости, 10^5 Па, для плоскостей (110) и (211) и значения класса твердости для $Y_3Fe_5O_{12}$, $Y_3Ga_5O_{12}$ и $Y_3Al_5O_{12}$ [142—143]**

Гранат	Плоскость		Средняя микротвердость кристалла	Класс твердости по расширенной 15-точечной шкале Мооса
	(110)	(211)		
$Y_3Fe_5O_{12}$	1210±35 1400±35	1240±50	1230	7,5
$Y_3Ga_5O_{12}$	1450±45	1520±75	1490	8,0
$Y_3Al_5O_{12}$	1900±50	1650±85	1730	8,4

Таблица 29.24. **Характерные дислокации в $Y_3Fe_5O_{12}$, выявленные поляризационно-оптическим методом [144]**

Ось дислокации	[110]					[211]		
Плоскость скольжения	(001)		(110)		(112)	(111)		(311)
Вероятное направление вектора Бюргерса	[110]	[100]	[111]	[100]	[111]	[110]	[110]	[110]
Тип дислокаций, град	90	45	35	90	90	90	30	72

Таблица 29.25. **Температура Дебая $\theta_Д$ и экстраполированный к $\theta_Д$ коэффициент теплопроводности $\varkappa$ при этой температуре для различных гранатов [145]**

В скобках даны расчетные значения

Гранат	R	$\theta_Д$, К	$\varkappa$, Вт/(см·К)
$R_3Al_5O_{12}$	Y	750	0,042
	Gd	(640)	0,045
	Er	630	—
	Tm	620	—
	Tb	620	—
	Lu	(620)	0,043
$R_3Ga_5O_{12}$	Nd	715	—
	Yb	715	0,039
	Y	585	0,046
	Gd	520	0,051
$R_3Fe_5O_{12}$	Y	—	0,038
	Eu	—	—
	Lu	—	—

Таблица 29.26. **Коэффициент теплопроводности для $Y_3Fe_5O_{12}$ [145] в зависимости от температуры**

T, К	$\varkappa$, Вт/(см·К)	T, К	$\varkappa$, Вт/(см·К)
2,5	0,075	70	0,41
6	0,56	100	0,26
10	1,2	150	0,150
21	2,2*1	200	0,106
30	1,80	300	0,074
40	1,12	565	0,038*2
50	0,63		

*1 Максимальное значение.
*2 Экстраполированное значение.

Таблица 29.27. **Коэффициент линейного расширения поликристаллических гранатов $Y_{3-x}Gd_xFe_5O_{12}$ и $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ [146]**

Гранат	Коэффициент линейного расширения α, 10^{-6} град$^{-1}$	
	298 К	623 К
$Y_3Fe_5O_{12}$	8,30	11,0
$Y_{2,24}Gd_{0,76}Fe_5O_{12}$	8,00	11,0
$Y_{1,5}Gd_{1,5}Fe_5O_{12}$	8,10	10,4
$Y_3Fe_{4,7}Al_{0,3}O_{12}$	7,95	10,0
$Y_3Fe_{4,3}Al_{0,7}O_{12}$	8,10	10,0
$Y_3Fe_4Al_1O_{12}$	8,40	11,1
$Y_3Fe_{3,8}Al_{1,2}O_{12}$	8,30	10,5

Таблица 29.28. **Значения удельного сопротивления и диэлектрических потерь для граната $Y_3Fe_5O_{12}$ [147—148]**

Измеренное значение		Частота, ГГц	Температура, К
Поликристаллический образец			
ε'	16,7	9	293
$\operatorname{tg}\delta$*1:	$5 \cdot 10^{-5}$	9	293
	$7{,}2 \cdot 10^{-5}$	9	373
	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$	9	473
	$6{,}2 \cdot 10^{-4}$	9	573
Монокристаллический образец			
ρ, Ом · м:	$1{,}0 \cdot 10^{10}$	0	304
	$1{,}0 \cdot 10^{7}$	0	373
	$2{,}6 \cdot 10^{3}$	0	473
	$4{,}6 \cdot 10^{2}$	0	573

*1 Погрешность $\varepsilon'' \pm 3 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 29.29. **Типичные значения магнитостатических параметров некоторых пленок ферритов-гранатов с цилиндрическими магнитными доменами [119]**

h — толщина пленки; l — характеристическая длина материала; $H_{кол}$ — поле коллапса; σ_W — энергия доменной стенки; $d_{кол}$ — диаметр коллапса; K_u — коэффициент одноосной анизотропии; δ_W — ширина доменной стенки

Состав материала	$4\pi M_s$, $10^3/(4\pi)$ А/м	h, мкм	l, мкм	$\lambda \equiv l/h$	$H_{кол}$, 80 А/м		$d_{кол}$, мкм		σ_W, 10^{-3} Дж/м^2	K_u, 10^3 Дж/м^3	δ_W, мкм
					наблюдаемое	расчетное	наблюдаемое	расчетное			
$Gd_{1,5}Eu_{1,5}Fe_{4,5}Al_{0,5}O_{12}$	219	16,0	1,78	0,111	160	111	6,0	8,6	0,68	28,8	0,018
$Cd_{2,34}Tb_{0,66}Fe_5O_{12}$	137	15,0	1,53	0,102	75	72	7,5	7,6	0,23	3,3	0,054
$Er_3Fe_{4,3}Ga_{0,7}O_{12}$	132	4,4	1,50	0,341	32	32	6,0	6,0	0,21	2,8	0,058
$Er_2TbFe_{3,9}Al_{1,1}O_{12}$	136	17,0	1,27	0,075	82	79	7,0	7,0	0,19	2,2	0,067

Состав материалов	$4\pi M_s$, $10^3/(4\pi)$ А/м	h, мкм	l, мкм	$\lambda = l/h$	$H_{кол}$, 80 А/м		$d_{кол}$, мкм		σ_W, 10^{-3} Дж/м²	K_u, 10^3 Дж/м³	δ_W, мкм
					наблюдаемое	расчетное	наблюдаемое	расчетное			
$Y_{2,7}Sm_{0,3}Fe_{3,8}Ga_{1,2}O_{12}$	128	5,2	0,87	0,167	56	53	—	3,8	0,12	0,90	0,099
$Y_{1,52}Gd_{0,86}Yb_{0,62}Fe_{4,11}Ga_{0,89}O_{12}$	150	3,6	0,80	0,222	—	52	—	3,3	0,14	1,3	0,086
$Y_{1,55}Lu_{0,39}La_{0,06}CaFe_4GeO_{12}$	145	4,1	0,79	0,193	57	56	—	3,4	0,12	0,59	0,175
$Y_{2,86}La_{0,14}Fe_{3,75}Ga_{1,25}O_{12}$	150	3,8	0,72	0,189	46	58	—	3,0	0,13	1,0	0,098
$Eu_2ErFe_{4,3}Ga_{0,7}O_{12}$ [1*]	173	6,0	0,70	0,117	—	86	—	3,4	0,17	1,8	0,073
$Y_{1,9}Sm_{0,1}CaFe_4GeO_{12}$	163	4,0	0,66	0,165	70	68	—	2,9	0,13	0,44	0,249
$Eu_2ErFe_{4,3}Ga_{0,7}O_{12}$ [*2]	247	18,0	0,64	0,036	182	172	5,0	4,7	0,31	6,0	0,040
$Eu_{1,45}Ca_{1,1}Y_{0,45}Fe_{3,9}Si_{0,6}Ge_{0,5}O_{12}$	218	4,23	0,64	0,151	100	96	—	2,9	0,25	1,3	0,146
$Y_{2,6}Sm_{0,4}Fe_{3,8}Ga_{1,2}O_{12}$	240	2,8	0,63	0,225	64	83	—	2,6	0,29	5,2	0,044
$Gd_2LuFe_{4,4}Al_{0,6}O_{12}$	189	9,4	0,53	0,056	—	119	—	3,2	0,15	0,47	0,130
$Y_{1,03}Gd_{1,29}Yb_{0,68}Fe_{4,3}Al_{0,7}O_{12}$	175	2,1	0,51	0,243	70	58	—	2,1	0,12	0,96	0,101
$Er_{1,3}Gd_{0,95}Tb_{0,75}Fe_{4,5}Al_{0,5}O_{12}$	181	11,5	0,35	0,030	140	131	3,0	2,7	0,091	0,52	0,138
$Y_{1,2}Lu_{0,65}Sm_{0,4}Fe_{4,1}(CaGe)_{0,9}O_{12}$	330	3,0	0,35	0,117	—	163	—	1,7	0,30	2,3	0,104
$Tm_{2,15}Eu_{0,85}Fe_{4,45}Ga_{0,55}O_{12}$	700	0,67	0,13	0,194	212	268	—	0,55	0,50	5,35	0,074
$Lu_{1,6}Sm_{0,6}La_{0,2}Fe_{4,4}(CaGe)_{0,6}O_{12}$	784	1,1	0,12	0,109	—	400	—	0,59	0,58	7,06	0,065
$Lu_{1,8}Sm_{1,2}Fe_5O_{12}$	1750	4,2	0,05	0,012	—	1435	—	0,58	1,25	30,4	0,031
$Tm_{2,15}Sm_{0,85}Fe_5O_{12}$	1378	0,87	0,047	0,054	900	879	—	2,9	0,71	18,1	0,031

[1*] Пленка на подложке из гадолиний-галлиевого граната.
[2*] Монокристалл.

Таблица 29.30. **Эффект Фарадея ($\lambda = 1,152$ мкм) в некоторых ферритах-гранатах [150]**

$\Delta a = a_{подложка} - a_{пленка}$

Состав пленки	Δa, 10^{-1} нм	M_s, $10^3/(4\pi)$ А/м	θ_F, 10^2 град/м	θ_F / M_s
$Y_3Fe_5O_{12}$	+0,004	1780 ⊥	+250	0,02
$Bi_{0,1}\ Y_{2,9}\ Fe_5O_{12}$	—0,010	1750 ⊥	+150	0,008
$Bi_{0,45}\ Y_{2,55}\ Fe_4Ga_1O_{12}$	—0,027	310 ⊥	—340	1,2
$Y_3Fe_{4,75}\ Sc_{0,25}\ O_{12}$	—0,021	1780 ∥	+175	0,01
$Y_3Fe_{3,95}\ Sc_{0,25}\ Ga_{0,8}\ O_{12}$	—0,012	620 ∥	+ 95	0,02
$Y_3Fe_{3,75}Sc_{0,25}Ga_{1,0}\ O_{12}$	—0,009	400 ∥	+ 80	0,04
$Y_3Fe_{3,55}Sc_{0,25}Ga_{1,2}\ O_{12}$	+0,002	180 ∥	+ 70	0,14
$Gd_{0,6}\ Y_{2,4}\ Fe_{4,3}\ Ga_{0,7}\ O_{12}$	—0,006	450 ∥	+180	0,16
$Gd_{0,7}\ Y_{2,3}\ Fe_{2,8}\ Ga_{1,2}\ O_{12}$	—0,013	100 ∥	+140	1,96
$Gd_{0,7}\ Y_{2,3}\ Fe_{3,8}\ Ga_{1,2}\ O_{12}$	—0,009	30 ∥	+ 53	3,12
$Yb_{2,6}\ Pr_{0,4}\ Fe_4Ga_1O_{12}$	+0,022	280 ∥	—123	0,25
$Yb_{2,3}\ Pr_{0,7}\ Fe_4Ga_1O_{12}$	—0,017	260 ∥	—125	0,23
$Yb_2Pr_1Fe_4Ga_1O_{12}$	—0,042	386 ∥	—135	0,12
$(YbPr)_{2,5}\ Bi_{0,5}\ Fe_4Ga_1O_{12}$	—0,031	270 ∥	—675	6,25
$(YbPr)_{2,3}\ Bi_{0,7}\ Fe_{3,8}\ Ga_{1,2}O_{12}$	—0,002	150 ∥	—950	40
$(YbPr)_{2,1}\ Bi_{0,9}Fe_{3,85}Ga_{1,15}O_{12}$	—0,019	220 ∥	—1190	30

Таблица 29.31. **Намагниченности иттриевого граната M_s и подрешеток M_a и M_d и обменные интегралы J_{ij} по результатам измерений различными методами [151]**

Метод	$4\pi M_s$ (295К), мТл	$\frac{M_s\ (295\ \text{K})}{M_s\ (0\ \text{K})}$	$\frac{M_a\ (295\ \text{K})}{M_a\ (0\ \text{K})}$	$\frac{M_d\ (295\ \text{K})}{M_d\ (0\ \text{K})}$	J_{ad}, см$^{-1}$	J_{dd}, см$^{-1}$	J_{aa}, см$^{-1}$
Ядерного магнитного резонанса [186]	—	0,725	0,89	0,835	—	—	—
То же [187]	—	0,733	0,888	0,837	—	—	—
» [188]	—	0,730	0,895	0,84	—	—	—
Дифракции нейтронов [189]	—	0,76	0,94	0,88	—	—	—
Маятникового магнетометра [190]	181,2	0,734	—	—	—	—	—
То же [191]	179	0,725	—	—	—	—	—
Магнитных весов [192]	177	0,717	—	—	25,36	8,45	11,86
Вибромагнетометра, магнитостатических мод, индукционный [193]	180±1	0,729	—	—	—	—	—
Теории молекулярного поля [151]	176,7	0,729	0,896	0,84	25,64	7,8	11,0
Рассеяния нейтронов [191]	—	—	—	—	27,24	4,38	13,07

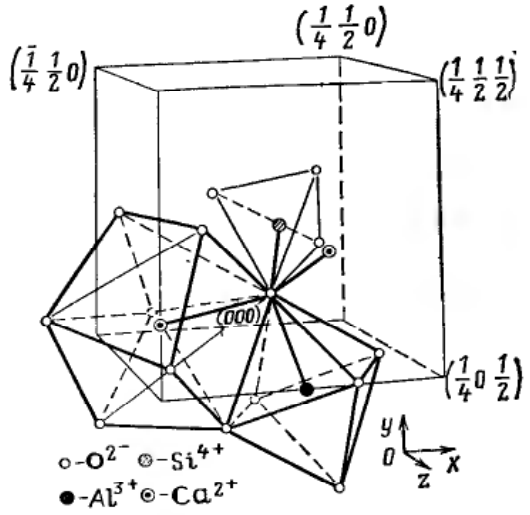


Рис. 29.20. Координации ионов в различных подрешетках в структуре граната $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ [152]

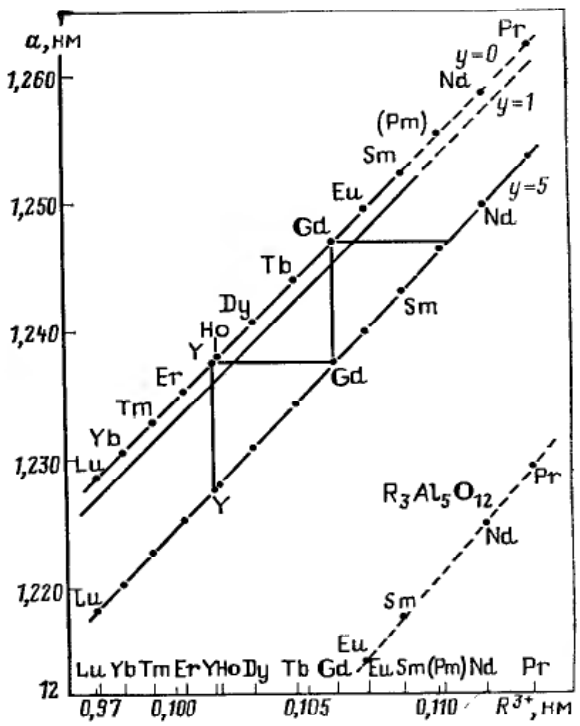


Рис. 29.21. Размеры элементарной ячейки ферритов-гранатов $R_3Fe_{5-y}Ga_yO_{12}$; $r^{VI}_{Fe^{3+}}=6{,}42\cdot10^{-2}$ нм; $r^{VI}_{Ga^{3+}}=6{,}17\times$ $\times10^{-2}$ нм; $r^{VI}_{Al^{3+}}=5{,}40\cdot10^{-2}$ нм; $r^{VIII}_{La^{3+}}=1{,}192\cdot10^{-2}$ нм[153]

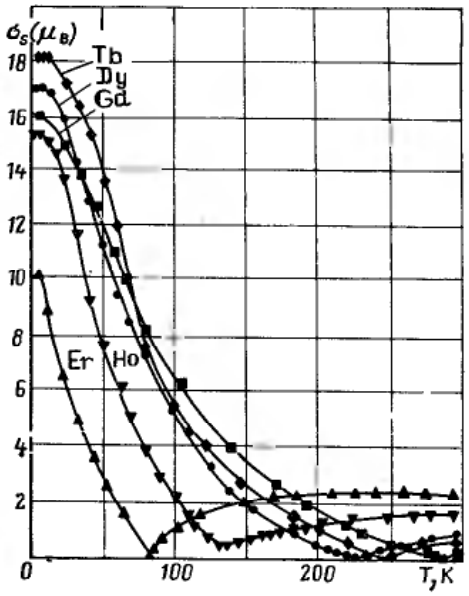


Рис. 29.22. Температурная зависимость спонтанной намагниченности в магнетонах Бора на формульную единицу в ферритах-гранатах Gd, Tb, Dy, Ho и Er [154]

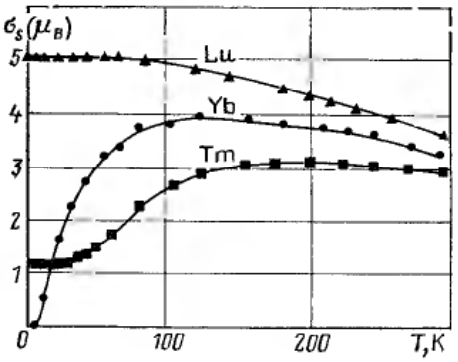


Рис. 29.23. Температурная зависимость спонтанной намагниченности в магнетонах Бора на формульную единицу в ферритах-гранатах Tm, Yb и Lu [154]

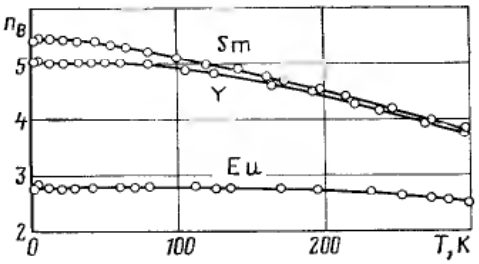


Рис. 29.24. Температурная зависимость намагниченности насыщения в магнетонах Бора на формульную единицу для монокристаллических образцов в форме сфер, имеющих возможность свободно вращаться во внешнем поле. Данные для иттриевого феррита-граната получены на поликристаллическом образце [155]

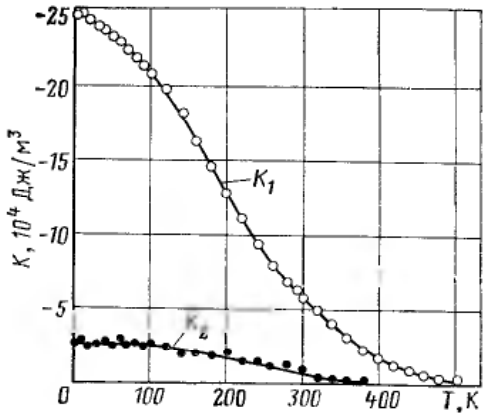


Рис. 29.25. Температурные зависимости первой и второй констант магнитной кристаллографической анизотропии в $Y_3Fe_5O_{12}$ [156]. Значения K_2 при низкой температуре сильно зависят от концентрации примесей, в особенности двухвалентного железа Fe^{2+}

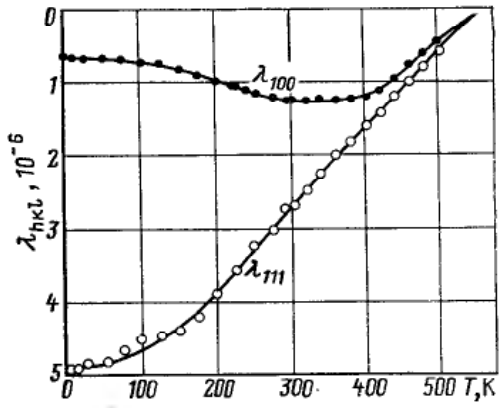


Рис. 29.26. Температурные зависимости магнитострикционных коэффициентов λ_{100} и λ_{111} в иттриевом феррите-гранате $Y_3Fe_5O_{12}$ [157]

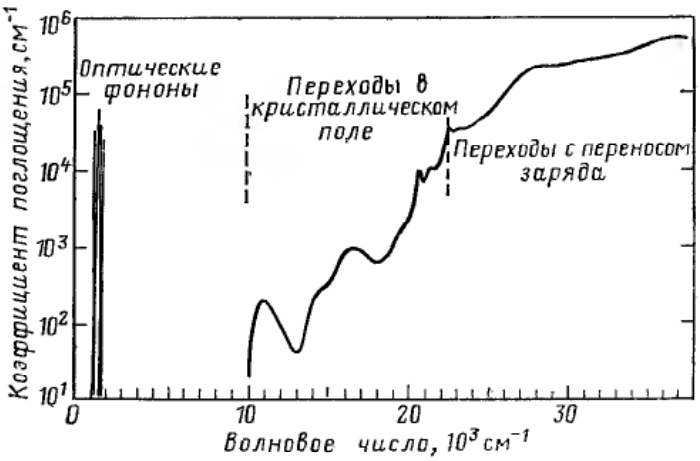


Рис. 29.27. Зависимость коэффициента поглощения (lg α) от волнового числа в $Y_3Fe_5O_{12}$. В диапазоне от 10 000 см$^{-1}$ до 40 000 см$^{-1}$ данные приведены при температуре 77 К. Полосы фононного поглощения показаны схематически [158]

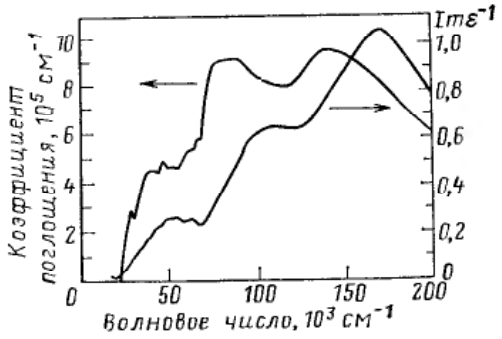


Рис. 29.28. Коэффициент поглощения $Y_3Fe_5O_{12}$ при высоких энергиях [159]

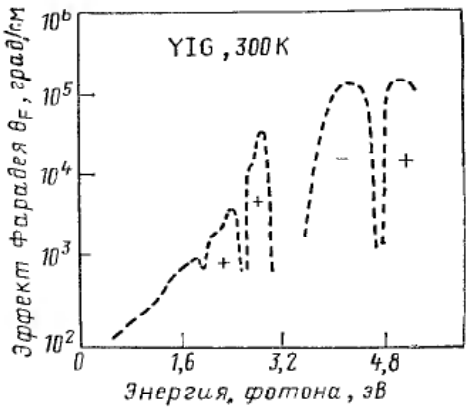


Рис. 29.29. Эффект Фарадея в иттриевом феррите-гранате $Y_3Fe_5O_{12}$ [160]

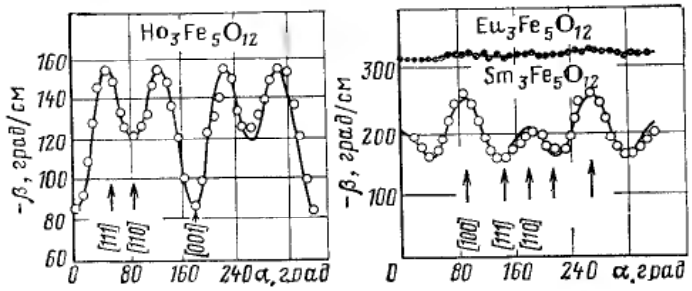


Рис. 29.30. Анизотропия магнитного линейного двупреломления на волне $\lambda = 1{,}15$ мкм при $T = 300$ К в ферритах-гранатах гольмия, европия и самария [161]

29.4. ГЕКСАГОНАЛЬНЫЕ ФЕРРИТЫ

Большая группа ферримагнитных оксидов обладает гексагональной кристаллической структурой. На рис. 29.31 приведена диаграмма, на которой указаны химические составы таких веществ. В углах расположены соединения BaO, MeO и Fe_2O_3. Символ Me означает двухвалентный ион первой переходной группы или ионы Zn^{2+} и Mg^{2+}, а также комбинацию этих ионов (например, Li+ и Fe^{3+}). На линии диаграммы, соединяющей BaO и Fe_2O_3, отмечена точка, соответствующая антиферромагнитному бариевому ферриту $BaFe_2O_4$. Точка S на линии $MeO—Fe_2O_3$ соответствует соединению $Me_2Fe_4O_8$ с кубической кристаллической структурой типа шпинели. Точка M отвечает оксиду, имеющему гексагональную структуру и химический состав $BaFe_{12}O_{19} = BaO \cdot 6Fe_2O_3$. Точка Y на диаграмме соответствует соединению $Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22} = 2(BaO \cdot MeO \cdot 3Fe_2O_3)$.

Известно также большое число соединений с составами, лежащими на линиях $M—S$ и $M—Y$, а элементарная ячейка этих соединений может быть легко построена из ячеек структуры S, M и Y. В большинстве случаев ион Ba^{2+} ($r = 0{,}143$ нм) может быть частично или полностью замещен ионами Ca^{2+} ($r = 0{,}106$ нм), Sr^{2+} ($r = 0{,}127$ нм) или Pb^{2+} ($r = 0{,}132$ нм) или трехвалентными ионами, например La^{3+} ($r = 0{,}122$ нм).

Энергия кристаллографической магнитной анизотропии гексагональных кристаллов описывается формулой

$$E_a = K_1 \sin^2\theta + K_2 \sin^4\theta + K_3' \sin^6\theta + K_3 \sin^6\theta \cos^6(\varphi - \psi), \qquad (29.12)$$

где E_a — энергия анизотропии; K_1, K_2, K_3' и K_3 — коэффициенты анизотропии; θ и φ — полярные координаты. Для полей анизотропии

$$\left.\begin{aligned} &\theta_0 = 0; \quad H_\theta^A = \frac{2K_1}{M_s}; \\ &\theta = 90°; \quad H_\theta^A = -\frac{2(K_1 + 2K_2)}{M_s}; \\ &\sin\theta_0 = \sqrt{-\frac{K_1}{2K_2}}; \quad H_\theta^A = 2\left(\frac{K_1}{K_2}\right)\frac{K_1 + 2K_2}{M_s}. \end{aligned}\right\} \qquad (29.13)$$

Здесь H_θ^A — напряженность эффективного поля, необходимого для поворота вектора намагниченности в те направления, где меняется только θ, а H_φ^A — поле, вращающее вектор намагниченности на поверхности конуса. Значение H_φ^A определяется формулой

$$H_\varphi^A = 36\,|K_3|\,\frac{\sin^4\theta_0}{M_s}. \qquad (29.14)$$

Свойства гексагональных ферритов отражены в табл. 29.32 — 29.44 и на рис. 29.31 — 29.44.

В численных значениях табулированных параметров возможны некоторые неточности, связанные с неопределенностью состава и физического состояния образцов, на которых производились измерения. Различная термическая обработка также может изменить такие параметры, как распределение катионов между узлами, пористость и т. д. Поэтому во всех случаях, когда необходима более подробная информация, следует обращаться к оригинальной литературе.

Таблица 29.32. **Некоторые характеристики ферромагнитных оксидов с гексагональной структурой**

Оксид	Символ	Число слоев в элементарной ячейке	Пространственная группа	Параметр c, нм	Рентгеновская плотность d_X, 10^3 кг/м^3	Молекулярная масса M, а. е. м.	Литература
$BaFe_{12}O_{19}$	**M**	(10)	$P6_3/mmc$	2,32	5,28	1112	[164]
$Ba_2Fe_4O_8$	**S**	—	—	—	5,24	232	[166]
$BaFe_2Fe_{16}O_{27}$	**W**	$(14)_1$	$P6_3/mmc$	3,2845	5,31	1575	[165]
$Ba_2Fe_2Fe_{28}O_{46}$	**X**	$(12)_3$	$R\bar{3}m$	8,411	5,29	2686	[165]
$Ba_2Fe_2Fe_{12}O_{22}$	**Y**	$(6)_3$	$R\bar{3}m$	4,3588	5,39	1408	[165]
$Ba_3Fe_2Fe_{24}O_{41}$	**Z**	$(22)_1$	$P6_3/mmc$	5,23	5,33	2520	[165]
$Ba_3Zn_2Fe_{40}O_{65}$	—	$(17)_2$	$P6_3/mmc$	7,936	—	—	[167, 168]
$Ba_4Zn_2Fe_{36}O_{60}$	**M_2Y**	$(16)_3$	$R\bar{3}m$	3,81	5,31	3622	[167]
$Ba_4Zn_2Fe_{52}O_{84}$	—	$(22)_3$	$R\bar{3}m$	15,385	—	—	[167, 168]
$Ba_5Zn_2Fe_{64}O_{103}$	—	$(27)_2$	$P6_3/mmc$	12,576	—	—	[167, 168]
$Ba_8Zn_6Fe_{60}O_{104}$	—	$(28)_3$	$R\bar{3}m$	20,04	—	—	[167]
$Ba_{10}Zn_8Fe_{72}O_{126}$	—	$(34)_3$	$R\bar{3}m$	24,398	—	—	[167]
$Ba_{12}Zn_{10}Fe_{84}O_{148}$	—	$(40)_1$	$R\bar{3}m$	9,584	—	—	[167]
$Ba_{14}Zn_{12}Fe_{96}O_{170}$	—	$(46)_3$	$R\bar{3}m$	33,109	—	—	[167]

Таблица 29.33. **Состав и структура гексагональных ферритов типа Me_2Y_n, где Me—Mn, Zn** [169]

Состав	Последовательность блоков	Количество анионных слоев	Пространственная группа	Параметр c, нм	
				Эксперимент	Расчет
$Ba_{20}(Mn, Zn)_{18}Fe_{132}O_{236}$	$M(Y)_4M(Y)_5$	$(64)_3$	$R\bar{3}m$	46,2	46,2
$Ba_{22}(Mn, Zn)_{20}Fe_{144}O_{258}$	$M(Y)_5M(Y)_5$	$(70)_1$	$P6_3/mmc$	16,86	16,85
$Ba_{24}(Mn, Zn)_{22}Fe_{156}O_{280}$	$M \ldots M(Y)_{11}$	$(76)_3$	$R\bar{3}m$	54,93	54,92
$Ba_{24}(Mn, Zn)_{22}Fe_{156}O_{280}$	$M(Y)_1M(Y)_{10}$	$(76)_1$	$P\bar{3}m1$	18,31	18,31
$Ba_{24}(Mn, Zn)_{22}Fe_{156}O_{280}$	$M(Y)_4M(Y)_7$	$(76)_1$	$P\bar{3}m1$	18,31	18,31
$Ba_{24}(Mn, Zn)_{22}Fe_{156}O_{280}$	$M(Y)_5M(Y)_6$	$(76)_3$	$R\bar{3}m$	54,93	54,92
$Ba_{28}(Mn, Zn)_{26}Fe_{180}O_{324}$	$M(Y)_6M(Y)_7$	$(88)_3$	$R\bar{3}m$	63,67	63,64

Таблица 29.34. **Рентгеновская плотность d_X и молекулярная масса M некоторых оксидов с гексагональной кристаллической структурой** [5]

Металл	W=$BaMe_2Fe_{16}O_{27}$		Y=$Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22}$		Z=$Ba_3Me_2Fe_{24}O_{41}$	
	d_X, 10^3 кг/м^3	M, а.е.м.	d_X, 10^3 кг/м^3	M, а.е.м.	d_X, 10^3 кг/м^3	M, а.е.м.
Mg	5,10	1512	5,14	1346	5,20	2457
Mn	5,31	1573	5,38	1406	5,33	2518
Fe	5,31	1575	5,39	1408	5,33	2520
Co	5,31	1577	5,40	1410	5,35	2522
Ni	5,32	1580	5,40	1414	5,35	2526
Cu	5,36	1590	5,45	1424	5,37	2536
Zn	5,37	1594	5,46	1428	5,37	2539

Таблица 29.35. **Значения температуры Кюри и намагниченности насыщения гексаферритов типа Me_2W** [5]

Металл	T_C, К	σ_s, 10^{-3} кА·м^2/кг		M_s, кА/м	n_B, μ_B ($T = 0$ К)	
		0 К	293 К	0 К	Эксперимент	Расчет
Mn_2	690	97	59	310	27,4	29,2
Fe_2^{2+}	730	98	78	416	27,4	28
$NiFe^{2+}$	790	79	52	275	22,3	26,4
$ZnFe^{2+}$	700	108	73	382	30,7	31,6
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe^{2+}$	720	104	68	362	29,5	29,2

Таблица 29.36. **Значения температуры Кюри и намагниченности насыщения гексаферритов типа Me_2Y [5]**

Металл	T_C, К	σ_S, 10^{-3} кА·м²/кг		M_S, кА/м	n_B, μ_B ($T = 0$ К)	
		0 К	293 К	0 К	Эксперимент	Расчет
Mg	550	20	23	120	6,9	2,2
Mn	560	42	31	167	10,6	9,2
Co	610	39	34	183	9,8	7,4
Ni	660	25	24	127	6,3	4,6
Cu	—	28	—	—	7,1	2,6
Zn	400	72	42	227	18,4	20,0

Таблица 29.37. **Значения температуры Кюри и намагниченности насыщения гексаферритов типа Me_2Z [5]**

Металл	T_C, К	σ_S, 10^{-3} кА·м²/кг		M_S, кА/м	n_B, μ_B ($T = 0$ К)	
		0 К	293 К	0 К	Эксперимент	Расчет
Mg	—	55	—	—	24	26,9
Co	680	69	50	267	31,2	29,8
Ni	—	54	—	—	24,6	26,1
Cu	710	60	46	247	27,2	27,1
Zn	630	—	58	310	—	—

Таблица 29.38. **Магнитные свойства ферритов типа $SrO \cdot nFe_2O_3$ и $PbO \cdot nFe_2O_3$ [170—172]**

Соединение	M_S, кА/м	M_r, кА/м	H_c, кА/м
$SrFe_8O_{13}$ ($SrO \cdot 4FeO_3$)	259	179	239
$SrFe_{12}O_{19}$ ($SrO \cdot 6Fe_2O_3$)	247	183	229
$SrFe_{18}O_{28}$ ($SrO \cdot 9Fe_2O_3$)	151	120	267
$PbFe_8O_{13}$ ($PbO \cdot 4Fe_2O_3$)	279	159	119
$PbFe_{12}O_{19}$ ($PbO \cdot 6Fe_2O_3$)	199	143	231
$PbFe_{18}O_{28}$ ($PbO \cdot 9Fe_2O_3$)	135	80	191

Таблица 29.39. **Константа анизотропии K_3, намагниченность насыщения и поле анизотропии H_φ^A для некоторых гексагональных ферримагнитных оксидов [5]**

Соединение	T, К	M_S, кА/м	K_3, Дж/м³	H_φ^A, А/м
$Ba_2Co_2Fe_{12}O_{22}$	77	210	200	27 100
	293	187	80	12 300
	443	145	15	2940
$Ba_3Co_{1,5}Fe^{2+}_{0,5}Fe_{24}O_{41}$	293	280	5,5	558
	431	220	0,9	160
$Ba_3Co_{1,92}Fe^{2+}_{0,08}Fe_{24}O_{41}$	293	280	12,0	1270
$Ba_2CoZn_{0.5}Fe^{2+}_{0,5}Fe_{24}O_{41}$	293	290	2,5	239
$Ba_2Zn_{1,5}Fe^{2+}_{0,5}Fe_{12}O_{22}$	293	190	0,6	80

Таблица 29.40. **Значения констант анизотропии K_1 или $K_1 + 2K_2$, намагниченности насыщения M_S и напряженности поля анизотропии H_0^A некоторых гексагональных оксидов при температуре 293 К [5]**

Оксид	Символ	K_1, 10^5 Дж/м³	K_1+2K_2, 10^5 Дж/м³	M_S, кА/м	H_0^A, кА/м
$BaFe_{12}O_{19}$[*1]	**M**	+3,3	—	380	1350
$BaFe_{18}O_{27}$[*1]	Fe_2W_2	+3,0	—	314	1510
$BaZnFe_{17}O_{27}$	FeZnW	+2,4	—	380	1000
$BaZn_{1.5}Fe_{16,5}O_{27}$	$Fe_{0,5}Zn_{1,5}W$	+2,1	—	380	885
$BaMnZnFe_{16}O_{27}$	MnZnW	+1,9	—	370	811
$BaNi_2Fe_{16}O_{27}$	Ni_2W	+2,1	—	330	1010
$BaNi_{0,5}ZnFe_{16,5}O_{27}$	$ZnFe_{0,5}Ni_{0,5}W$	+1,6	—	350	725
$BaCo_{0,75}Zn_{0,75}Fe_{16,5}O_{27}$	$Fe_{0,5}Co_{0.75}Zn_{0,75}W$	—	—0,4	360	175
$Ba_2Mg_2Fe_{12}O_{22}$	Mg_2Y	—	—0,6	119	800
$Ba_2Ni_2Fe_{12}O_{22}$	Ni_2Y	—	—0,9	127	1110
$Ba_2Zn_2Fe_{12}O_{22}$	Zn_2Y	—	—1,0	227	715
$Ba_2Zn_{1,5}Fe_{12,5}O_{22}$[*1]	$Fe_{0,5}Zn_{1,5}Y$	—	—0,9	191	756
$Ba_2Co_2Fe_{12}O_{22}$[*1]	Co_2Y	—	—2.6	185	2230
$Ba_3Co_2Fe_{24}O_{41}$[*1]	Co_2Z	—	—1,8	270	1030

[*1] Измерения проводились на монокристаллах.

Таблица 29.41. **Магнитные свойства монокристаллов гексаферритов $BaFe_{12-2x}Ir_x^{4+}Zn_x^{2+}O_{19}$ с большой анизотропией в базисной плоскости [173]**

x	H_a, кА/м (T = 300 К)		ΔH, кА/м (T = 300 К)	T_C, К	σ_s, $\frac{А \cdot м^2}{кг}$ (T=300 К)
	Из измерений намагниченности	Из ферромагнитного резонанса			
0	1350	1350	4,2 при 55 ГГц	720	65
0,16	765	—	—	635	—
0,52	1200	1270	83,5 при 17 ГГц	560	65
0,56	1270	—	—	550	60
0,60	1600	1750	93,5 при 14 ГГц	520	47

Таблица 29.42. **Ширина линии ферромагнитного резонанса для монокристаллов Me_2Y [174]**

Монокристалл	Параметр c, нм	ΔH, А/м (T = 300 К)
$Ba_2Zn_2Fe_{12}O_{22}$	4,36	638 (9000 МГц)
$Ba_2(Zn, Mn)Fe_{12}O_{22}$ (3,5% Mn по массе)	4,3564	303 (9000 МГц) 390 (17 300 МГц)

Таблица 29.43. **Свойства некоторых гексагональных ферритов, используемых в волноводах в миллиметровом диапазоне длин волн [175]**

Состав	$T_{обж}$, К	ρ, 10^3 $\frac{кг}{м^3}$	Степень ориентации	tg δ (f = 9,5 ГГц)	$\varepsilon'/\varepsilon_н$ (f = 9,5 ГГц)	M_s, $\frac{кА}{м}$	H_a, $\frac{кА}{м}$	T_C, К	$f_{рез}$, ГГц
Система $BaO \cdot 2NiO \cdot xAl_2O_3 \cdot (8-x)Fe_2O_3$, *обозначаемая* $NiW(xAl)$									
Ni_2W (0,40Al)	1573	4,58	0,69	—	—	—	1210	750	49,0
Ni_2W (0,60Al)	1623	4,58	0,88	0,001	15,4	214	1360	730	52,0
Ni_2W (0,73Al)	1623	4,60	0,83	0,003	14,9	195	1430	720	55,0
Ni_2W (0,86Al)	1623	4,63	0,84	0,004	15,1	181	1510	710	58,0
Ni_2W (1,00Al)	1623	4,55	0,86	0,002	14,5	166	1570	690	62,0
Система $SrO \cdot xAl_2O_3 \cdot (6-x)Fe_2O_3$, *обозначаемая* $SrM(xAl)$									
SrM (0,00Al)	1623	4,91	0,79	—	—	334	1510	750	60,0
SrM (0,20Al)	1573	4,48	0,87	0,001	18,6	263	1600	730	64,0
SrM (0,53Al)	1573	4,11	0,89	0,001	16,2	168	2010	690	74,0
SrM (0,80Al)	1573	4,00	0,91	—	—	—	2470	650	86,0
SrM (0,95Al)	1573	3,95	0,88	—	—	—	2780	630	93,0

Таблица 29.44. **Поле анизотропии H_a и tg δ некоторых гексаферритов типа М, используемых в миллиметровом диапазоне длин волн [176]**

Гексаферрит	H_a, кА/м	tg δ (9 ГГц)	$f_{рез}$, ГГц
$BaZn_{0,3}Ti_{0,3}Fe_{11,4}O_{19}$	1090	0,002	45
$BaAl_{0,3}Fe_{11,7}O_{19}$	1390	0,002	55
$SrNi_{0,3}Ge_{0,3}Al_{1,86}Fe_{9,54}O_{19}$	2170	0,006	82
$SrNi_{0,1}Ge_{0,3}Al_{2,5}Fe_{9,1}O_{19}$	2595	0,008	96

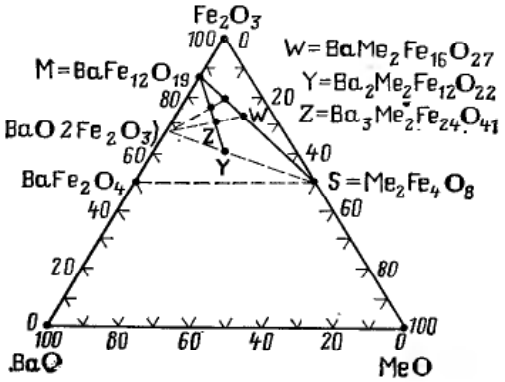


Рис. 29.31. Диаграмма составов ферримагнитных оксидов с гексагональной структурой. Символ Me обозначает двухвалентный ион (или комбинацию двухвалентных ионов) [166]

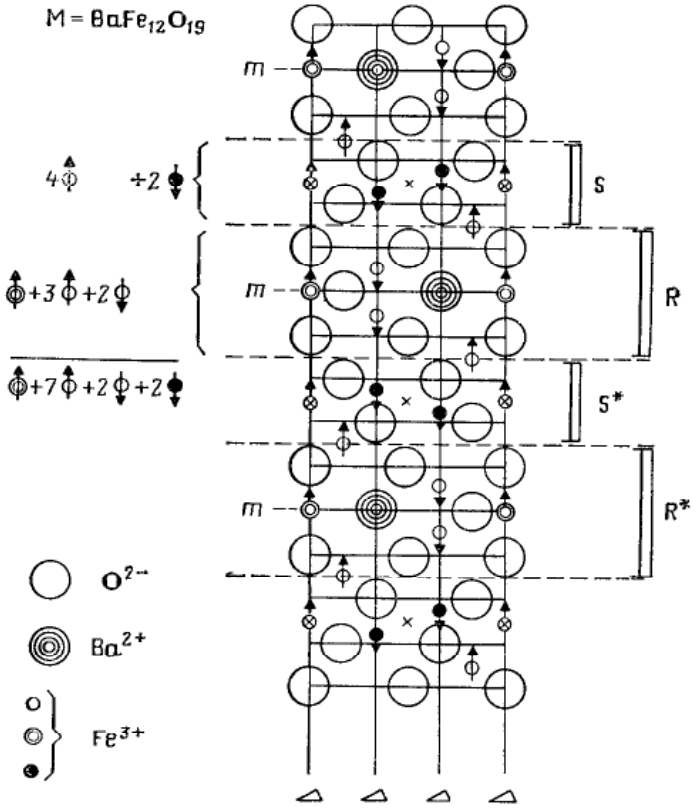


Рис. 29.32. Сечение структуры магнетоплюмбита **M** с осью *c*, направленной вертикально [5]:

стрелки — направление спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центров симметрии; через слои, содержащие ионы бария, проходят зеркальные плоскости, обозначенные буквой *m*; изображенная структура состоит из шпинельных блоков *S*, разделенных блоками, содержащими ионы бария; звездочки — поворот данного блока вокруг оси *c* на 180°

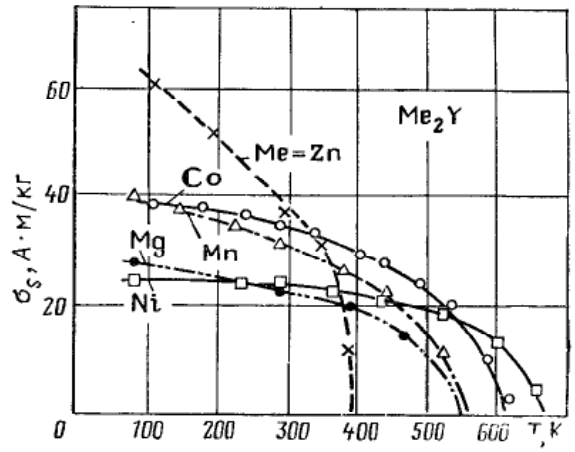


Рис. 29.34 Зависимость намагниченности насыщения σ_s соединений со структурой типа **Y** от температуры [5]. Измерения проводились на поликристаллических образцах в поле напряженностью 875 кА/м (11 кЭ)

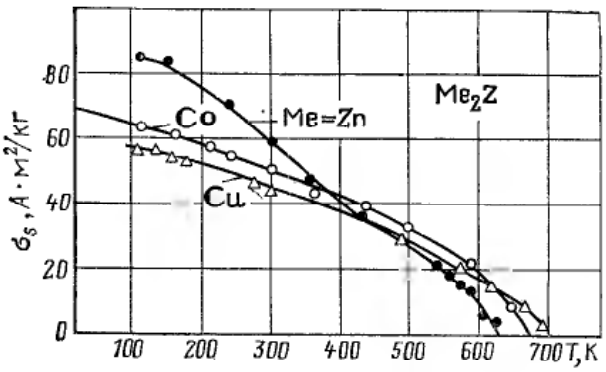


Рис. 29.35. Зависимость намагниченности насыщения σ_s соединений со структурой типа **Z** от температуры. Измерения проводились на поликристаллических образцах в поле напряженностью 875 кА/м для Co_2Z и Zn_2Z и 1430 кА/м — для Cu_2Z [5]

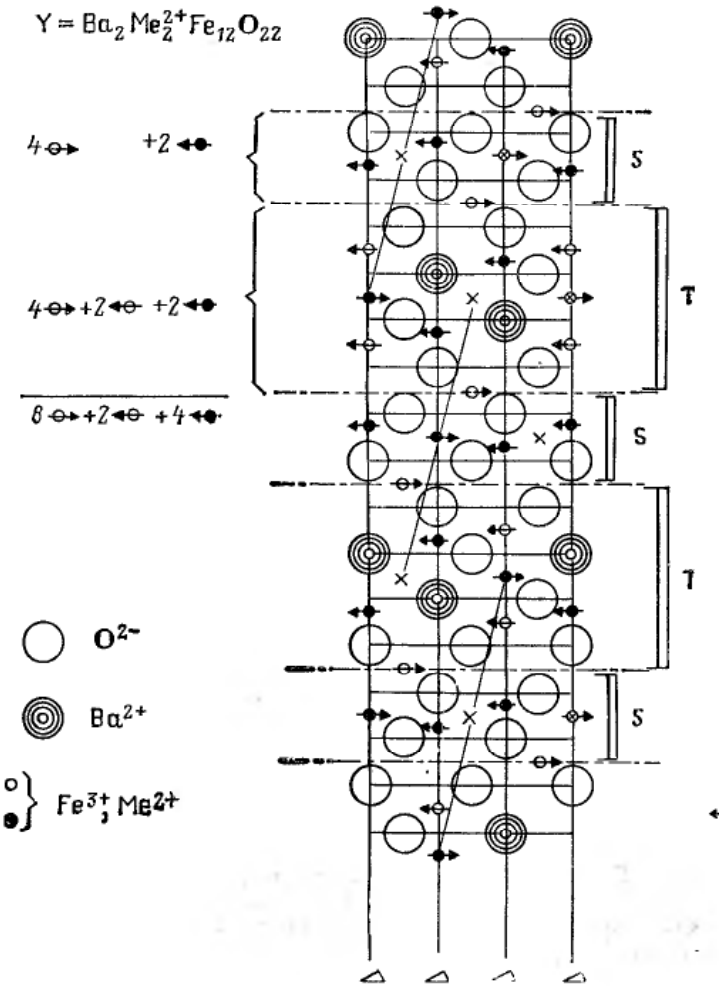


Рис. 29.33. Сечение структуры типа **Y** с осью *c*, направленной вертикально [5]:

стрелки — направления спинов, которые в данном случае ориентированы перпендикулярно осям *c*; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центров симметрии; изображенная структура состоит из последовательно расположенных блоков **S** и **T**

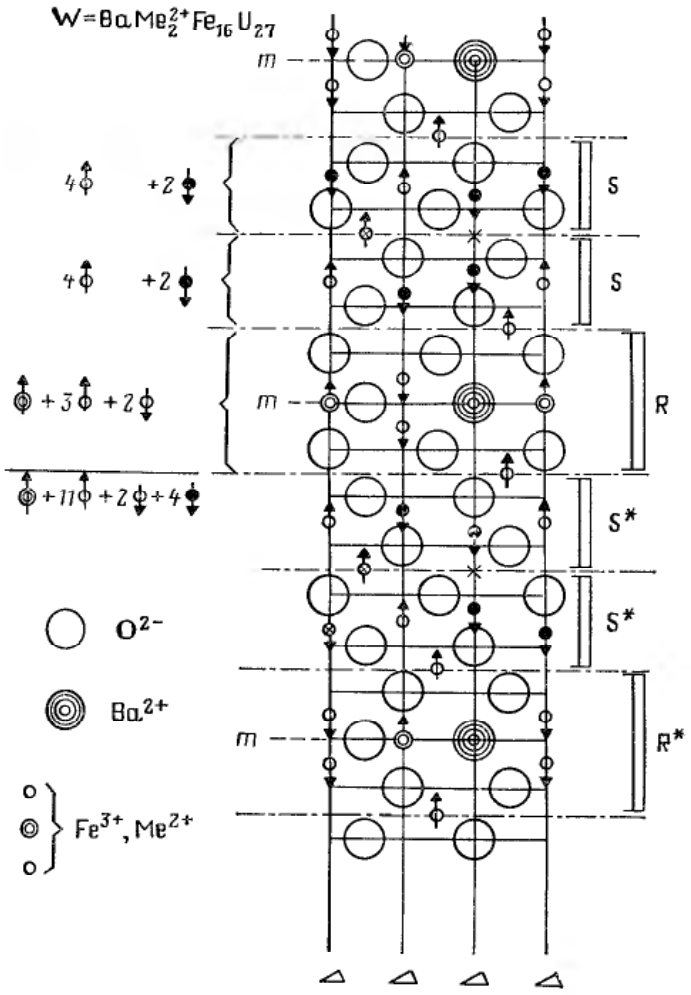


Рис. 29.36. Сечение структуры типа **W** с осью *c*, направленной вертикально [5]:

стрелки — направления спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; звездочки — поворот данного блока вокруг оси *c* на 180°; структуру можно рассматривать как сумму структур типа **M** и **S**

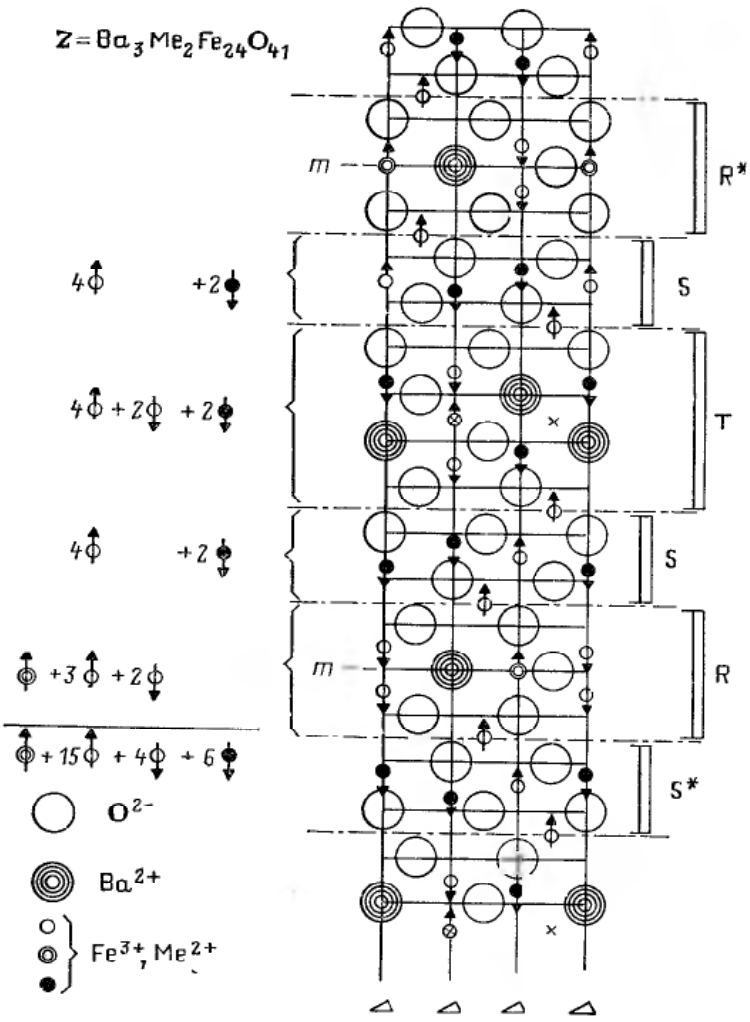


Рис. 29.37. Сечение структуры типа **Z** с осью *c*, направленной вертикально [5]:

стрелки — направления спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центра симметрии; звездочки — поворот данного блока вокруг оси *c* на 180°; структуру можно рассматривать как сумму структур типа **M** и **Y**

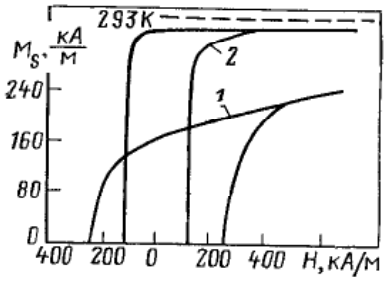


Рис. 29.38. Гистерезисные петли для образца $BaFe_{12}O_{19}$ [5]:

1 — изотропный образец; *2* — кристаллографически текстурированный образец

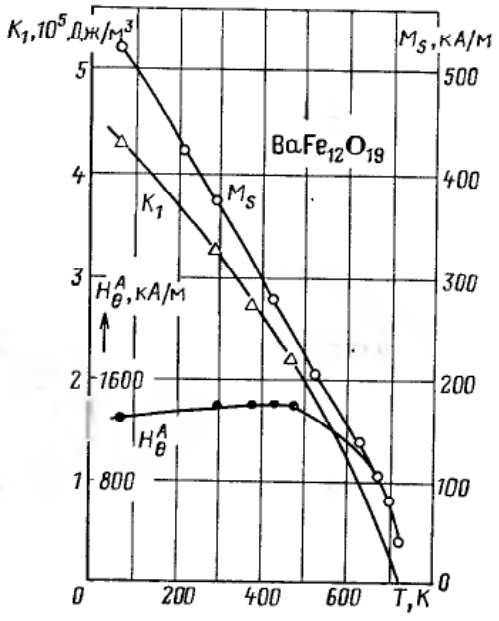


Рис. 29.39. Зависимость намагниченности насыщения M_s, константы анизотропии K_1 и поля анизотропии H_θ^A для $BaFe_{12}O_{19}$ от температуры

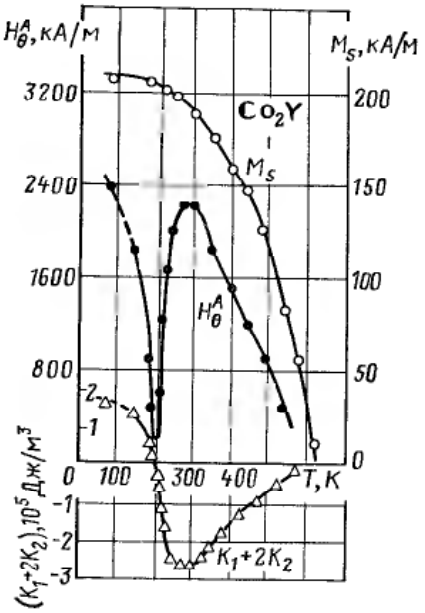


Рис. 29.40. Зависимость намагниченности M_s, констант анизотропии (K_1+2K_2) и поля анизотропии H_θ^A для Co_2Y от температуры [5]

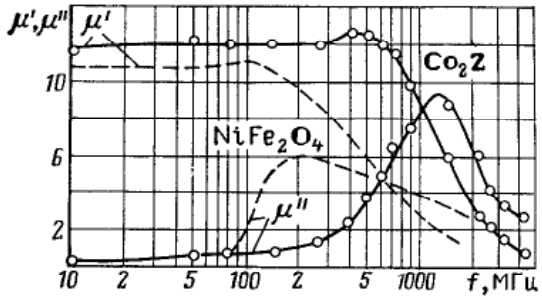


Рис. 29.41. Магнитные спектры поликристаллического образца Co_2Z и шпинели $NiFe_2O_4$, которая имеет примерно такую же магнитную проницаемость на низких частотах [5]

29.5. НЕКОТОРЫЕ ФЕРРО- И ФЕРРИМАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Таблица 29.45. **Магнитные свойства соединений трехвалентного хрома с галогенами [177]**

θ_p — парамагнитная точка Кюри; $2K_1/M_s$ — напряженность поля анизотропии; $p_{эф}$ — эффективный магнитный момент

Соединение	Структура	ρ_x, 10^3 кг/м³	T_C, К	θ_p, К	n_B, μ_B	M_S, кА/м	$\frac{2K_1}{M_S}$, кА/м (T=1,5 К)	K_1, Дж/м³ (T=1,5 К)	$p_{эф}$, μ_B
CrF_3	$D_{3d}^6 - R\bar{3}c$; $a = 0{,}52643$ нм; $\alpha = 56{,}563°$	—	69,8	—124	—	—	—	—	3,85
$CrCl_3$	$D_3^3 - P3_112$; $D_3^5 - P_212$; $a = 0{,}6$ нм; $c = 1{,}73$ нм	2,95	16,8	+31	—	308	—	—	3,69
$CrBr_3$	$C_{3i}^2 - R\bar{3}$; $a = 0{,}626$ нм; $c = 1{,}82$ нм	4,75	35,7	+47	3,0	259	546	$9{,}4\cdot10^4$	3,85
CrI_3	$D_3^3 - P3_112$	5,36	68	+70	3,1	214	2260	$3{,}1\cdot10^5$	4,03

Таблица 29.46. **Магнитные свойства** $CoMnO_3$, $NiMnO$, $BiMnO_3$ и $BiCrO_3$

Соединение	Структура	Параметры ячейки (T = 300 К)	T_C, К	n_B, μ_B	$p_{эф}$, μ_B	Литература
$CoMnO_3$	$C_{3i}^2 - R\bar{3}$	$a = 0{,}5385$ нм; $\alpha = 54°31'$	120	0,72 (0 К)	—	[180—182]
$NiMnO_3$	$C_{3i}^2 - R\bar{3}$	$a = 0{,}5343$ нм; $\alpha = 54°39'$	120—160	0,76 (0 К)	—	[180—182]
$BiMnO_3$	Перовскит	$a = c = 0{,}3935$ нм; $b = 0{,}3989$ нм; $\alpha = \gamma = 91°28'$; $\beta = 90°58'$	103	2 (77 К) 4 (экстраполяция)	5	[178, 179]
$BiCrO_3$	»	$a = c = 0{,}3906$ нм; $b = 0{,}387$ нм; $\alpha = \gamma = 90°33'$; $\beta = 89°9'$	123	—	—	[178, 179]

Таблица 29.47. **Кристаллографические и магнитные свойства ферримагнитных фторидов с ионами Fe^{3+}, Cr^{3+} и Co^{3+} [183]**

Соединение	Параметры ячейки		T_C, К	n_B, μ_B (0 К)	M_s, кА/м (0 К)
	в высокотемпературной фазе	в низкотемпературной фазе			
$Na_5Fe_3F_{14}$	$a = 0{,}734$ нм; $c = 1{,}038$ нм; $\rho = 3260$ кг/м³	$a = 7{,}323$ нм; $b = 0{,}746$ нм; $c = 1{,}272$ нм; $\beta = 90 \pm 0{,}5°$; $\rho = 3150$ кг/м³	80	5	199
$Na_5Cr_3F_{14}$	—	—	< 20	—	—
$Na_5Co_3F_{14}$	—	—	$77 < T_C < 200$	—	—

Таблица 29.48. **Магнитные свойства соединений двухвалентного европия**

Соединение	Структура	Параметры ячейки, нм	T_C, К	θ_p, К	n_B, μ_B ($T = 0$ К)	Литература
EuF_2	Кубическая	0,585	2	—5	—	[184]
$EuCl_2$	Ромбическая	$a = 0{,}448$ $b = 0{,}748$; $c = 0{,}896$	—	0	—	[184]
$EuBr_2$	Ромбическая	$a = 0{,}43$; $b = 0{,}92$; $c = 1{,}142$	—	0	—	[184]
EuI_2	Моноклинная	$a = 0{,}762$; $b = 0{,}823$; $c = 0{,}788$; $\beta = 98°$	5	+5	7	[184]
EuO	NaCl	0,514	73	+76	6,8	[184]
EuS		0,595	16,5	+19	6,87	
EuSe		0,619	7	+9	6,7	
EuTe		0,66	9,5	—6	6,9	
$Eu_2P_2O_7$	Тетраэдрическая	—	—	—3	—	[185]
$Eu_3(PO_4)_2$	Ромбоэдрическая	—	—	+5	6,7	[185]
Eu_2SiO_4	Ромбическая (порошок)	$a = 0{,}971$; $b = 4{,}956$; $c = 0{,}595$	7	+7	6,0	[184]
Eu_2SiO_4	Ромбическая (монокристалл)	$a = 0{,}971$; $b = 4{,}956$; $c = 0.565$	—	+10	6,5	[184]
Eu_3SiO_5	Тетраэдрическая	—	4	+19	6,71	[184]
$EuAl_2O_4$	—	—	—	0	—	[185]
$Eu_3Al_2O_6$	Псевдокубическая	—	—	10	6,2	
$Eu_5Al_2O_8$	—	—	—	6	5,8	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Неель Л.** Антиферромагнетизм: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1956.
2. **Вонсовский С. В.** Магнетизм. М.: Наука, 1971.
3. **Гуревич А. Г.** Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973.
4. **Wangsness R. K.**//Phys. Rev. 1954. Vol. 93. P. 68—71.
5. **Смит Я., Вейн Х.** Ферриты. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
6. **Shull C. G., Wollen E. O., Kohler W. C.** — Phys. Rev. 1951. Vol. 84. P. 912—921.
7. **Bickford L. R., Brownlow J. M., Penoyer R. F.**// Proc. Instn. Electr. Engrs. 1957. Vol. 104B, Suppl. 5. P. 238.
8. **Bickford L. R., Pappis J., Stull J. L.**//Phys. Rev. 1955. Vol. 99. P. 1210—1217.

9. **Bickford L. R.**//Ibid. 1950. Vol. 78. P. 449—457.
10. **Calhoun B. A.**//Ibid. 1954. Vol. 94. P. 1582—1585.
11. **Nathans R. e. a.**//Proc. Instn. Electr. Engrs. 1957. Vol. 104B, Suppl. № 5. P. 217—219
12. **Verwey J. W., Heilmann E. L.**//J. Chem. Phys. 1947. Vol. 15. P. 174—180.
13. **Gorter E. W.**//Philips Res. Repts. 1954. Vol. 9 P. 295—296.
14. **Galt J. K., Matthias B. T., Remeika J. P.**//Phys. Rev. 1950. Vol. 79. P. 391—392.
15. **Bozorth R. M., Tilden E. F., Williams A. J.**//Ibid. 1955. Vol. 99. P. 1788—1798.
16. **Dwight K., Menyuk N.**//Bull. Amer. Phys. Soc. 1958. Vol. 3. Ser. 2. P. 41.
17. **Smit J., Wijn H. P. J.**//Advances in Electronics and Electr. Phys. 1954. Vol. 6. P. 83—84.
18. **Vager W. A., Galt J. K., Merritt F. R.**//Phys. Rev. 1955. Vol. 99. P. 1203—1210.
19. **Генделев С. Ш., Лаповок Б. Л., Рубинштейн Б. Е.**//Физика твердого тела. 1963. Т. 5. С. 3037—3038.
20. **Sekizawa H., Sekizawa K.**//J. Phys. Soc. Japan. 1962. Vol. 17. Suppl. B-1. P. 380—383.
21. **Epstein D. J.**//Conf. on Magn. and Magn. Mater., Boston, Amer. Inst. Electr. Engng. 1957. P. 498—499.
22. **Van Uitert L. G.**//J. Chem. Phys. 1956. Vol. 24 P. 306—310.
23. **Hastings J. M., Corliss L. M.**//Phys. Rev. 1956. Vol. 104. P. 328—331.
24. **Dillon J. F., Geschwind S., Jaccarino V.**//Phys Rev. 1955. Vol. 100. P. 750—752.
25. **Гуревич А. Г., Гублер И. Е., Титова А. Г.**//Физика твердого тела. 1961. Т. 3. С. 19—31.
26. **Teale R. W.**//J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33, Suppl. № 3. P. 1295—1298.
27. **Завета К., Свирина Е., Маликова О.**//Физика твердого тела. 1962. Т. 4. С. 3593—3595.
28. **Braun P. B.**//Nature. 1952. Vol. 170. P. 1123.
29. **Folen V. J.**//J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31, Suppl. P. 1665—1675.
30. **Schnitzler A. D., Folen V. J., Rado G. T.**//J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31, Suppl. № 3. P. 348—352.
31. **Enz U.**//Erzeugung von Vetterschaft mit Ferriten Thesis. Zürich. 1955.
32. **Comstock R. L., Remeika J. P.**//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 1018—1019.
33. **Nielsen J. W., Lepore D. A., Zneimer J., Townsend G. B.**//J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33. Suppl. № 3. P. 1379—1380.
34. **Bertaut E.**//Compt rend. 1950. Vol. 230. P 213—216.
35. **Prince E., Trueting R. G.**//Acta crystallogr. 1956. Vol. 9. P. 1025—1028.
36. **Weil L., Bertaut F., Bochirol L.**//J. Phys. rad. 1950. Vol. 11. P. 208—212.
37. **Gorter E. W.**//Nature. 1950. Vol. 165. P. 798—799.
38. **Okamura T., Kojima Y.**//Phys. Rev. 1952. Vol. 86. P. 1040—1041.
39. **Weisz R. S.**//Ibid. 1954. Vol. 96. P. 800—801.
40. **Snoek J. L.**//Philips Techn. Rev. 1946. Vol. 8. P. 353—355.
41. **Okamura T., Torizuka Y.**//Nature. 1951. Vol. 168. P. 872.
42. **Okamura T., Fujimura T., Date M.**//Phys. Rev. 1952. Vol. 85. P. 1041—1042
43. **Рабкин Л. И.** Высокочастотные ферромагнетики. М. — Л.: Физматгиз. 1960.
44. **Bochirol L.**//Compt. rend. 1951. Vol. 233. P. 736—738.
45. **Prince E.**//Phys. Rev. 1956. Vol. 102. P. 674—676.
46. **Pauthenet R.**//Compt. rend. 1950. Vol. 230. P. 1842—1845.
47. **Guillaud C.**//Rev. Mod. Phys. 1953. Vol. 25, P. 64—74.
48. **Tannenwald P. E.**//Phys. Rev. 1955. Vol. 90. P. 463—464.
49. **Torizuka Y.**//Sci. Repts Inst. Tôhoku Univ. 1951. Vol. A3. P. 383—384.
50. **Gorliss L. M., Hasting J. M., Brockman F. G.**// Phys. Rev. 1953. Vol. 90. P. 1013—1018.
51. **Bacon G. N., Roberts F. F.**//Acta crystallogr. 1953. Vol. 6. P. 57—59.
52. **Jones G. O., Roberts F. F.**//Proc. Phys. Soc. (Lond.). 1952. Vol. 65B. P. 390—393.
53. **Belson H. S., Kriessman C. J.**//J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30. P. 170S—170S.
54. **Rado G. T., Folen V. J., Emerson W. H.**//Proc. Inst. Electron. Engrs. 1957. Vol. 104B, Suppl. 5. P 198—199.
55. **Yager W. A., Merrit F. R., Guillaud C.**//Phys. Rev. 1951. Vol. 81. P. 477—478.
56. **Торопов Н. А., Борисенко А. И.**//Журнал прикл. химии. 1950. Т. 88. С. 1243.
57. **Inoue T., Iida S.**//J. Phys. Japan. 1958. Vol. 13. P. 656—657.
58. **Тикадзуми С.** Физика ферромагнетизма: Пер. с япон./Под ред. Г. А. Смоленского и Р. В. Писарева. М.: Мир, 1983.
59. **Arai K.-I., Tsuya N.**//Ferrites: Proc. of the Intern. Conf. 1970. P. 51—54.
60. **Hastings J. M., Corliss L. M.**//Rev. Mod Phys. 1953. Vol. 25. P. 114—121.
61. **Ferromagnetic materials.** A handbook on the properties of magnetically ordered substances/Ed. E. P. Wohlfarth. — North — Holland Publ. Comp. 1980. Vol. 2.
62. **Guillaud C., Greveaux H.**//Compt rend 1950. Vol. 230. P. 1458—1461.
63. **Guillaud C.**//J. phys. et radium. 1951. Vol. 12. P. 239.
64. **Okamura T., Kojima Y., Torizuka Y.**//Sci. Repts. Inst. Tôhoku Univ. 1952. Vol. A4. P. 72.
65. **Okamura T.**//Phys. Rev. 1952. Vol. 85. P 690.
66. **Gorter E. W.**//Philips Res. Repts. 1954. Vol. 9. P. 295.
67. **McGuire T. R.**//Phys. Rev. 1953. Vol 91. P. 206.
68. **Carter A. E., Miles D. A., Welch A. J. A.**//Proc. Inst. Electr. Engrs. 1957. Vol. 104B, Suppl. 5. P. 141
69. **Gorter E. W.**//Philips Res. Repts. 1954. Vol. 9. P. 403.
70. **Maria Neto J. e. a.**//J. Appl. Phys. 1984. Vol 55, № 6, pt. II B. P. 2338—2339
71. **Смоленский Г. А.**//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1952. Т. 16. С. 728—740.
72. **Enz U.**//Physica. 1958. Vol. 24. P. 609
73. **Метфессель Э., Маттис Д.** Магнитные полупроводники: Пер. с англ. М.: Мир, 1972.
74. **Магнитные** полупроводники — халькогенидные шпинели/К. П. Белов и др. М.: Изд. МГУ, 1981.
75. **Нагаев Э. Л.** Физика магнитных полупроводников. М.: Наука, 1979.
76. **Menyuk N., Dwight K., Arnott R. J.**//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. № 3. P. 1387—1389.
77. **Остин Н., Илуэл Д.** Магнитные полупроводники// Успехи физ. наук. 1972. Т. 106. С. 337—364.
78. **Wojtowicz P. J.**//IEEE Trans. Magn. 1969. Vol. 5. P. 840.
79. **Белов К. П., Королева Л. И., Гордеев И. В.**//Физика низких температур. 1975. Т. 1. С. 1540—1542.
80. **Busch G., Magyar B., Wachter P.**//Phys. Lett. 1966. Vol. 23. P. 438—440.
81. **Sato K., Teranishi T.**//J. Phys. Soc. Japan. 1970. Vol. 29. P. 523—524.
82. **Jarsen P. K., Wittekoek S. W.**//Phys. Rev. Lett. 1972. Vol. 29. P. 1597—1599.

83. **Shepherd I. W.**//Solid State Commun. 1970. Vol. 8. P. 1835—1838.
84. **Hlidek P., Polivka V. e. a.**//Proc. 10-th. Congr. ICO. Prague, 1975. P. 320—325.
85. **Harbeke G., Pinch H. L.**//Phys. Rev. Lett. 1966. Vol. 17. P. 1090—1093.
86. **Wen C. P., Hershenov B., Philipsborn H., Pinch H. L.**//Appl. Phys. Lett. 1968. Vol. 13. P. 188—190.
87. **Haas C.**//IBM J. Res. Develop. 1970. Vol. 14. P. 282—288.
88. **Minematsu K., Miyatani K., Takahashi T.**//J. Phys. Soc. Jap. 1971. Vol. 31. P. 123—129.
89. **Stoyanov S. G., Iliev M. N., Stoyanova S. P.**//Solid State Commun. 1976. Vol. 18. P. 1389—1392.
90. **Goodenough J. B.**//J. Phys. Chem. Solids. 1969. Vol. 30. P. 261—280.
91. **Голик Л. Л., Григорович С. М., Кунькова З. Э. и др.**//Физика твердого тела. 1975. Т. 16. С. 2151—2153.
92. **Балкарей Ю. И., Бару В. Г., Голик Л. Л.**//Микроэлектроника. 1976. Т. 5. С. 475—488.
93. **Moser F., Ahrenkiel R. K., Carnall E. e. a.**//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 1449—1451.
94. **Bongers P. F., Zanmarchi G.**//Solid State Commun. 1968. Vol. 6. P. 291—294.
95. **Lee T. H., Coburn T., Gluck R.**//Ibid. 1971. Vol. 9. P. 1821—1824.
96. **Ahrenkiel R. K., Coburn T. J., Carnall E.**//IEEE Trans. Magnet. 1974. Vol. MAG-10. P. 2—7.
97. **Menzer G.**//Z. Kristallogr. 1928. Bd. 69. S. 300—396.
98. **Gibbs G. V., Smith J. V.**//Amer. Mineral. 1965. Vol. 50. P. 2023—2028.
99. **Prandl W.**//Z. Kristallogr. 1966. Bd. 123. S. 81—116.
100. **Abrahams S. C., Geller S.**//Acta crystallogr. 1958. Vol. 11. P. 437.
101. **Callen E.**//J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. P. 519—527.
102. **Кирюхин В. П., Соколов В. И.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 51. С. 428—432.
103. **Le Craw R. C., Comstock R. L.**//Physical Acoustics. Vol. III. P. B. Lattice Dynamics//Ed. W. P. Mason. N. — Y. — Lond.: Academic Press. 1965.
104. **Wickersheim K. A.**//Magnetism/Ed. G. Rado and H. Suhl. Academic Press. 1963.
105. **Tinkham H.**//J. Appl. Phys. 1962. Vol. 33, Suppl. P. 1248—1253.
106. **Wood D. L., Remeika J. P.**//Ibid. 1967. Vol. 38. P. 1038—1045.
107. **Dillon J. F. Jr.**//J. Phys. et radium. 1959. Vol. 20. P. 374—377.
//J. Appl. Phys. 1958. Vol. 29. P. 539—541.
108. **Кринчик Г. С., Четкин М. В.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 40. С. 729—733; Т. 41. С. 673—680.
109. **Писарев Р. В., Синий И. Г., Смоленский Г. А.**// Письма ЖЭТФ. 1969. Т. 9. С. 112—114, 264—266; 1969. Т. 57. С. 737—741.
110. **Dillon J. F.**//J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 1230—1234.
111. **Geller S.**//Z. Kristallogr. 1967. Bd 125, N° 1. S. 1—47.
112. **Geller S., Gilleo M. A.**//J. Phys. Chem. Solids. 1957. Vol. 3. P. 30.
113. **Euler F., Bruce J. A.**//Acta Cryst. 1965. Vol. 19. P. 971—975.
114. **Bonnet M., Delapalme A., Fuess H., Thomas M.**// Acta crystallogr. 1975. Vol. B31. P. 2233—2240.
115. **Эмиралиев А., Кочаров А. Г., Бакрадзе Р. В. и др.** Кристаллография. 1976. Т. 21. С. 391—392.
116. **Espinosa G. P.**//J. Chem. Phys. 1962. Vol. 37. P. 2344—2347.
117. **Strocka B., Holst P., Tolksdorf W.**//Philips Journ. Res. 1978. Vol. 33. P. 186.
118. **Tcheou F., Fuess H., Bertaut E. E.**//Solid St. Commun. 1970. Vol. 8. P. 1745—1758.
119. **Winkler G.** Magnetic Garnets. F. Vieweg and Sohn: Braunschweig/Wiesbaden. 1981.
120. **Яковлев Ю. М., Генделев С. Ш.**//Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике. М.: Советское радио, 1975.
121. **Филиппов В. В., Шильников Ю. Р., Яковлев Ю. М., Салыганов В. И.**//Материалы научно-технической информации/Синтез и исследование ферромагнитных кристаллов. М. ЦНИИ «Электроника». 1970. Вып. 9 (25). С. 34—37.
122. **Яковлев Ю. М., Шильников Ю. Р., Галактионова Г. М. и др.**//Ферритовые СВЧ приборы и материалы. ЦНИИ «Электроника», 1972. С. 188—193.
123. **Clark A. E., Desavage B., Coleman W. e. a.**// J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 1296—1297.
124. **Петраковский Г. А., Смокотин Э. М., Титова А. Г.**//Физика твердого тела. 1967. Т. 9. С. 2324—2329.
125. **Смокотин Э. М., Петраковская Э. А., Саблина К. А.**//Тонкие магнитные пленки, вычислительная техника и радиотехника. Красноярск, 1970. Т. 2. 127—130.
126. **Mandel V. S., Smokotin E. M., Petrakovskii G. A., Lebed B. M.**//Phys. Stat. Solidi. 1968. Vol. 30. P. K111—K113.
127. **Philips T. G., White R. L.**//Phys. Rev. Letts. 1966. Vol. 16. P. 650—651.
128. **Яковлев Ю. М., Галактионова Г. М., Бурдин Ю. И., Петров Р. А.**//Электронная техника. Сер. 7. Ферритовая техника. 1968. № 4 (16). С. 26—41.
129. **Яковлев Ю. М., Шильников Ю. Р., Галактионова Г. М., Салыганов В. И.**//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1971. Т. 35. С. 110—113.
130. **Van der Kraan A. M., Van Loef J. J.**//Proc. Conf. Tihany. 1971. Application of Mössbauer effect. Tichany. 1971. P. 519.
131. **Heller P., Benedek G. B.**//Phys. Rev. Lett. 1962. Vol. 8. P. 428—432.
132. **Eastman D. E.**//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 2312—2316.
133. **Bateman T. B.**//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 2194—2195.
134. **Spencer E. G., Denton R. T., Bateman T. B. e. a.**// J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 3059—3060.
135. **Alton W. J., Barlow A. J.**//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 3023—3024.
136. **Петраковский Г. А.**//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1970. Т. 34. P. 1052—1063.
137. **Spencer E. G., Denton R. T., Bateman T. B. e. a.**// J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 3059—3060.
138. **Alton W. J., Barlow A. J.**//J. Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 3023—3024.
139. **Haussühl S., Mateika D.**//Z. Naturforsch. 1972. Bd. 27a. S. 1522—1523.
140. **Graham L. J., Chang R.**//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 2247—2248.
141. **Haussühl S., Mateika D., Tolksdorf W.**//Z. Naturforsh. 1976. Bd. 31a. S. 390—392.
142. **Генделев С. Ш., Щербак Н. Г.**//Кристаллография. 1965. Vol. 10. P. 708.
143. **Hergt R., Görnert P.**//Phys. Stat. Solidi(a). 1974. Vol. 21. P. 77—86.
144. **Дедух Л. М., Никитенко В. И.**//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1970. Т. 34, № 6. С. 1235—1239.
145. **Slack G. A., Oliver D. W.**//Phys. Rev. 1971. Vol. 4B. P. 592—609.
146. **Щелкотунов В. А., Данилов В. Н., Калачева В. С.**//Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1976. Vol. 12. P. 1076—1079.

147. **Verweel J.**//Proc. IEEE B 109, Suppl. 1962. Vol. 21. P. 95.
148. **Bethe K., Verweel J.**//IEEE Trans. Magn. 1969. Vol. Mag-5. P. 474.
149. **Johnson B., Walton A. K.**//Brit. Journ. Appl. Phys. 1965. Vol. 16. P. 475.
150. **Daral J., Ferrand B., Geynet J. e. a.**//IEEE Trans. Magn. 1975. Vol. Mag-11, N° 5. P. 115—117.
151. **Röschmann P., Hansen P.**//J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. P. 6257—6269.
152. **Geller S.** Physics of Magnetic Garnets/Ed. by A. Paoletti. Amsterdam: North-Holland. 1978. P. 1—55.
153. **Tolksdorf W.**//Physics of magnetic garnets/Ed. by A. Paoletti. Amsterdam. North-Holland Publ. Comp. 1978. P. 521—539.
154. **Geller S., Remeika J. P., Sherwood R. C. e. a.**// Phys. Rev. 1965. Vol. 137. P. 1034—1038.
155. **Geller S., Williams H. J., Sherwood R. C. e. a.**// Phys. Rev. 1963. Vol. 131. P. 1080—1082.
156. **Hansen P.**//Philips. Res. Rep. Suppl. 1970. N° 7. P. 1—6.
157. **Hansen P.**//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 3638—3642.
158. **Scott G. B.**//Physics of Magnetic Garnets/Ed. by A. Paoletti. Amsterdam: North-Holland. Publ. Comp. 1978. P. 445—466.
159. **Галуза А. И., Еременко В. В., Кириченко А. П.**// Физика твердого тела. 1973. Т. 15. С. 585—587.
160. **Wemple S. H., Blank S. L., Seman J. A., Biolsi W. A.**//Phys. Rev. 1974. Vol. B9, P. 2134—2144.
161. **Писарев Р. В., Синий И. Г., Колпакова Н. Н., Яковлев Ю. М.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1971. Т. 60. С. 2188—2202.
162. **Geller S., Williams H. J., Espinosa G. P., Sherwood R. C.**//Bell Syst Techn. J. 1964. Vol. 43. P. 565—623.
163. **Яковлев Ю. М., Лебедь Б. М.**//Физика твердого тела. 1962. Т. 4. С. 3654—3662.
164. **Jonker G. H., Wijn H. P. J., Broun P. B.**//Philips Techn. Rev. 1956/57. Vol. 18. P. 145—147.
165. **Braun P. B.**//Philips Res. Repts. 1957. Vol. 12. P. 491—548.
166. **Ситидзе Ю., Сато Х.** Ферриты/Пер. с япон. М.: Мир, 1964.
167. **Kohn J. A., Eckart D. W.**//Z. Kristallogr. 1964. Bd. 119. S. 454—464.
168. **Kohn J. A., Eckart D. W.**//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 968—969.
169. **Levine B. F., Nowlin C. H., Jones R. V.**//Phys. Rev. 1968. Vol. 174. P. 571—582.
170. **Viliers G.**//Compt. rend. Acad. Sci. 1959. Vol. 248. P. 1974.
171. **Pauthenet R., Rimet G.**//Ibid. 1959. Vol. 249. P. 565.
172. **Kojima H.**//Sci. Repts. Res. Inst. Tôhoku Univ. 1955. Vol. A7. P. 502.
173. **Tauber A., Kohn J. A., Savage R. O.**//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 1265.
174. **Savage R. O., Dixon S., Tauber A.**//Ibid. 1965. Vol. 36. P. 873.
175. **Taft D. R.**//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 776.
176. **Okazaki T., Yutaka H.**//Electronics and Communications in Japan. 1974. Vol. 57, N° 7. P. 188.
177. **Dillon J. F., Kamimura H., Remeika J. P.**//J. Phys. Chem. Solid. 1966. Vol. 27. P. 1531.
178. **Sugawara F., Iida H., Syono Ya., Akimoto S.**// J. Phys. Soc. Japan. 1968. Vol. 25. P. 1553—1558.
179. **Боков В. А., Мыльникова И. Е., Кижаев С. А. и др.**//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 3695—3698.
180. **Bertaut E. F., Forrat F.**//J. Appl. Phys. 1958. Vol. 29. P. 247—248.
181. **Cloud W. H.**//Phys. Rev. 1958. Vol. 111. P. 1046—1049.
182. **Bozorth R. M., Walsh D. E.**//J. Phys. Chem. Solid. 1958. Vol. 5. P. 299.
183. **Knox K., Geller S.**//Phys. Rev. 1958. Vol. 110. P. 771—772.
184. **Shafer M. W., McGuire T. R.**//J. Appl. Phys. 1964. Vol. 35. P. 984—988.
185. **Shafer M. W.**//Ibid. 1965. Vol. 36. P. 1145—1152.
186. **Boyd E. L., Moruzzi V. L., Smart I. S.**//J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. P. 3049—3054.
187. **Genano R., Hunt E., Meyer H.**//Phys. Rev. 1967. Vol. 156. P. 521—533.
188. **Litster J. D., Benedek G. B.**//J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. P. 1320—1322.
189. **Prince E.**//Appl. Phys. 1965. Vol. 36. P. 1845—1847.
190. **Geller S.**//Phys. Rev. 1969. Vol. 181. P. 980—985.
191. **Зотов Т. Д., Сукровцева М. М.**//Физика твердого тела. 1964. Т. 11. С. 649—652.
192. **Andersen E. E.**//Phys. Rev. 1964. Vol. 134. P. A1581—A1585.
193. **Hansen P., Röschmann P., Tolksdorf W.**//J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. P. 2728.
194. **Plant J. S.**//J. Phys. C.: Solid State Phys. 1983. Vol. 16. P. 7037—7051.

Глава 30

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Н. А. Бабушкина

30.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Гальваномагнитные явления — совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках, по которому протекает электрический ток.

Термомагнитные явления — совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках, внутри которых имеется тепловой поток.

Наиболее характерные черты этих явлений связаны с воздействием индукции магнитного поля **B** на траектории движения носителей тока, которые искривляются из-за силы Лоренца и представляют собой спирали с образующей вдоль **B**. Если потоки теплоты и заряда распространяются вдоль **B**, то возникают продольные гальвано- и термомагнитные эффекты (ГМЭ и ТМЭ). Магнитное поле не меняет продольную составляющую импульса электрона, поэтому влияние его в этом случае невелико и продольные ГМЭ и ТМЭ для всех металлов невелики и заключаются соответственно в небольшом (порядка 1) увеличении электро- и теплосопротивления.

Если потоки теплоты и зарядов направлены перпендикулярно **B** ($\mathbf{q} \perp \mathbf{B}$, $\mathbf{j} \perp \mathbf{B}$), то возникают поперечные ГМЭ и ТМЭ. При этом, вообще говоря, направления электрического поля **E** и градиента температуры ∇T не совпадают с заданными направлениями векторов плотности тока **j** и потока тепла **q** (для определенности будем счи-

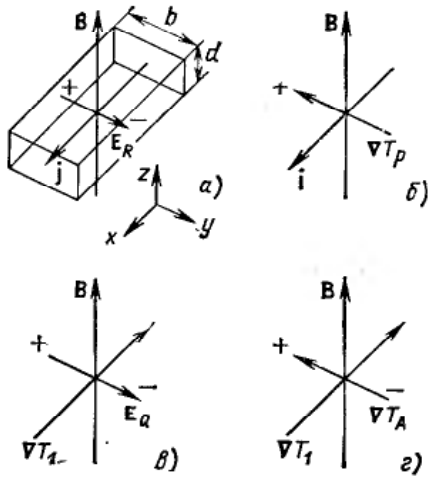


Рис. 30.1. Схемы ориентации векторов **B**, **j**, **E**, ∇T:
а — для эффекта Холла; *б* — для эффекта Эттингсгаузена; *в* — для эффекта Нернста; *г* — для эффекта Риги — Ледюка

тать потоки **j** и **q** направленными вдоль оси x, а магнитное поле — вдоль оси z, рис. 30.1).

В общем случае связь между величинами **j**, **E**, ∇T и **q** тензорная:

$$\mathbf{j} = \hat{\sigma}\mathbf{E} - \hat{\eta}\nabla T; \quad \mathbf{q} = -\hat{T}\hat{\sigma}\hat{S}\mathbf{E} - \hat{\varkappa}\nabla T,$$

где $\hat{\sigma}$, $\hat{S}$, $\hat{\varkappa}$, $\hat{\eta}$ — тензоры соответственно электропроводности, термо-ЭДС, теплопроводности, термоэлектрического тока $(\hat{\eta} = \hat{\sigma}\hat{S})$.

Если $\mathbf{j} \perp \mathbf{B}$, то:

1) в направлении, перпендикулярном к **j** и **B**, возникает электрическое поле (*эффект Холла*) $E_R = RjB$, где R — коэффициент Холла (рис. 30.1, *а*);

2) в направлении **j** изменяется электрическое сопротивление ρ. При этом $\rho_{xx} = E_x/j_x$ называют *магнитосопротивлением* (МС);

3) в направлении, перпендикулярном к **j** и **B**, возникает температурный градиент (*эффект Эттингсгаузена*) $\nabla T_P = PjB$, где P — коэффициент Эттингсгаузена (рис. 30.1, *б*).

Если $\mathbf{q} \perp \mathbf{B}$, то:

1) в направлении, перпендикулярном первичному градиенту температур ∇T_1 и **B**, возникает электрическое поле (*эффект Нернста*) $E_Q = QB\nabla T_1$, где Q — *коэффициент Нернста* (рис. 30.1, *в*);

2) в направлении, перпендикулярном первичному градиенту температур ∇T_1 и **B**, возникает градиент температур (*эффект Риги — Ледюка*) $\nabla T_A = AB\nabla T_1$, где A — коэффициент Риги — Ледюка (см. рис. 30.1, *г*);

3) в направлении первичного теплового потока изменяется теплопроводность.

Поведение ГМЭ и ТМЭ существенно различается (качественно и количественно) в областях слабого и сильного магнитных полей. Граница между этими областями определяется безразмерной величиной $\omega\tau$, где $\omega = eB/(m^*c)$ — циклотронная частота вращения электрона с эффективной массой m^*; τ — время между актами рассеяния.

В слабых магнитных полях $\omega\tau \ll 1$ для всех металлов $\rho_{xx} \propto B^2$ и $\Delta\rho/\rho \ll 1$, где $\Delta\rho = \rho(B) - \rho(0)$, $\rho \equiv \rho(0)$; $R = 1/(ne)$, где n — концентрация носителей тока; e — заряд носителей тока, равный $e = -1{,}6 \cdot 10^{-9}$ Кл.

Условие $\omega\tau \gg 1$ определяет область сильных магнитных полей, где асимптотики ГМЭ и ТМЭ определяются топологией поверхности Ферми (ПФ) и существенно различаются как для различных металлов, так и для различных ориентаций монокристаллов одного и того же металла.

ПФ — поверхность в импульсном пространстве, разграничивающая при $T = 0$ заполненные и свободные электронные состояния.

Условие $\omega\tau \gg 1$ выполняется обычно при низких температурах ($T \sim 4$ К) в чистых образцах (R (300 К)/R(4,2 К) $\sim 10^3$).

Связь топологии поверхности Ферми и гальваномагнитных эффектов. В случае $\omega\tau \gg 1$ траектория движения электрона в магнитном поле описывается уравнениями $\varepsilon = \text{const}$ (ε — энергия) и $p_z = \text{const}$ (p_z — проекция импульса на направление магнитного поля), что соответствует линии сечения ПФ в импульсном пространстве (пространстве скоростей) плоскостью, перпендикулярной магнитному полю. Если ПФ замкнутая, то все траектории в реальном пространстве — замкнутые орбиты, подобные сечению ПФ в импульсном пространстве и повернутые на $\pi/2$. Если ПФ — многосвязная бесконечная поверхность, то кроме замкнутых сечений имеются открытые траектории, которым в реальном пространстве соответствует движение электрона в направлении, повернутом на угол $\pi/2$ относительно направления открытости в пространстве скоростей.

Если ПФ замкнутая и $\omega\tau \gg 1$, то в электрическом поле E все электроны дрейфуют со скоростью $v_д = c\dfrac{\mathbf{E}\times\mathbf{B}}{B^2}$, что приводит к появлению недиссипативного тока и определяет эффект Холла и недиагональную компоненту тензора проводимости $\sigma_{xy} = ne/B \equiv \sigma_0/\omega\tau \propto B^{-1}$ ($\sigma_0 = ne^2\tau/m$ — проводимость без магнитного поля). В направлении электрического поля перенос заряда осуществляется посредством диффузии центров орбит, т. е. перескоков электронов при рассеянии на соседнюю орбиту. Это приводит к появлению диссипативного тока и определяет соответствующую диагональную компоненту тензора проводимости $\sigma_{xx} \cong \sigma_0/(\omega\tau)^2 \propto B^2$. Электроны на незамкнутых (открытых) орбитах в дрейфовом токе не участвуют. Для них проводимость в направлении открытости такая же, как и без магнитного поля, т. е. в данном случае $\sigma_{xx} \simeq \sigma_0$.

При наличии перекрытия двух последовательных энергетических зон, из которых нижняя была бы полностью заполнена, происходит перетекание электронов из одной зоны в другую. При этом концентрация пустых (дырочных) состояний n_2 в одной из зон совпадает с концентрацией заполненных (электронных) состояний n_1 в другой зоне. Такой металл принято называть компенсированным ($n_1 = n_2$). Дрейфовый ток в нем в первом приближении отсутствует. В случае замкнутых ПФ можно с определенностью говорить либо об электронном ее характере, если внутри находятся заполненные состояния, либо о дырочном, если она окружает пустые состояния. В этом случае, если $n_1 = n_2$, все компоненты тензора проводимости определяются диффузией центров орбит, т. е. $\sigma_{xx} \sim \sigma_{yy} \cong \sigma_0/(\omega\tau)^2 \propto B^2$. (На незамкнутой, а также многосвязной ПФ возможны как дырочные, так и электронные орбиты.) Приведенные выражения для компонент тензора проводимости исчерпывающим образом описывают все многообразие возможных асимптотик поведения гальваномагнитных свойств металлов.

В эксперименте определяют МС, т. е. $\rho_{xx} = \dfrac{E_x}{j_x} = \dfrac{\sigma_{yy}}{\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xx}\sigma_{yy}}$, и холловское сопротивление, т. е.

$$\rho_{xy} = \frac{E_y}{j_x} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xy}\sigma_{yy}} = RB,$$

где R — коэффициент Холла, который, однако, не для всех металлов яв-

ляется константой. При этом количественно МС определяется величиной $\omega\tau$ (а не собственно индукцией магнитного поля B), этим обусловлено так называемое эмпирическое *правило Колера*, согласно которому МС определяется магнитным полем $\left(\frac{\rho(B)}{\rho(0)} = f\left(\frac{B}{\rho(0)}\right)\right)$.

На рис. 30.3—30.22 приведены основные топологические типы ПФ, а в табл. 30.2 — данные о топологии ПФ металлов и ряда сплавов:

1. Для однозонных металлов с замкнутой ПФ (щелочные металлы) — $\rho_{xx} \sim \text{const}$ σ_0^{-1} — МС не зависит от B, и принято говорить о *насыщении* МС, а $\rho_{xy} = \frac{1}{ne} B$, т. е. коэффициент Холла $R = 1/(ne)$. В этом случае значение коэффициента Холла оказывается таким же, как и для области слабых магнитных полей $\omega\tau \leqslant 1$.

2. Для однозонных металлов с открытой ПФ (благородные металлы) $\rho_{xx} \sim \sigma_0^{-1}(\omega\tau)^2 \propto B^2$ в тех ориентациях **B** относительно осей кристалла, в которых открытые траектории возникают вдоль оси y (перпендикулярно току) в реальном пространстве, т. е. когда $\sigma_{yy} \sim \sigma_0$.

В остальных направлениях ρ_{xx} насыщается. На диаграмме вращения (изменение МС в зависимости от ориентации **B** относительно осей кристалла) МС почти везде невелико и имеют место острые максимумы, соответствующие открытым траекториям.

3. Для компенсированных металлов ($n_1 = n_2$) с замкнутыми ПФ (бериллий, молибден, вольфрам, полуметаллы) $\rho_{xx} \sim \sigma_0^{-1}(\omega\tau)^2 \propto B^2$ для всех направлений. Небольшая анизотропия, не зависящая от **B**, обусловлена несферичностью ПФ. Эффект Холла (и соответственно «коэффициент Холла») — сложная функция B, T и ориентации кристалла.

4. Для компенсированных металлов с открытой ПФ (магний, цинк, кадмий, олово, свинец и др.) $\rho_{xx} \sim \sigma_0^{-1}$, т. е. не зависит от B (насыщается) в тех ориентациях **B**, когда открытые траектории возникают вдоль оси x (параллельно току) в реальном пространстве, т. е. когда $\sigma_{xx} \sim \sigma_0$. В остальных направлениях $\rho_{xx} \propto B_2$. На диаграмме вращения МС почти везде велико и имеют место острые минимумы, соответствующие открытым траекториям.

5. Для многозонных некомпенсированных металлов ($n_1 \neq n_2$) с замкнутыми и открытыми ПФ (индий, алюминий, галлий, таллий) асимптотики ρ_{xx} такие же, как и в п. 1 и 2, а $\rho_{xy} = \frac{1}{ne} B$, где $n = n_1 - n_2$, за исключением отдельных ориентаций, когда следует учитывать геометрическую раскомпенсацию на многосвязных ПФ.

Во многих многозонных металлах в сильном магнитном поле становится возможным переход электронов на ПФ из одной зоны проводимости в соседнюю — так называемый магнитный пробой. Это приводит к новым траекториям и, таким образом, существенно влияет на гальваномагнитные эффекты.

Наиболее подробно топология поверхности Ферми рассмотрена в [1—3].

Основные теоретические и экспериментальные представления о магнитосопротивлении металлов имеются в [4—6]. В табл. 30.3, 30.4 и на рис. 30.24—30.53 приведены основные данные о МС металлов. Следует заметить, что при температуре 20°С и обычно используемых значениях магнитной индукции $B \sim 1$ Тл ($\omega\tau \leqslant 1$) $\Delta\rho/\rho$ для большинства металлов весьма мало. Например, для меди $\Delta\rho/\rho \approx 10^{-4}$ при $B = 2$ Тл. Исключением является висмут, для которого $\Delta\rho/\rho \approx 2$ при $B = 3$ Тл.

Эффект Холла. Основные теоретические и экспериментальные данные об эффекте Холла представлены в [7]. Коэффициент Холла R в металлах может быть положительным и отрицательным и даже менять знак с изменением температуры. В области высоких и промежуточных температур для большинства металлов он практически не зависит от температуры. Основные данные об эффекте Холла в металлах приведены в табл. 30.5 и на рис. 30.54—30.69.

В ферромагнетиках на электроны проводимости воздействует магнитное поле, отличное от внешнего. При этом наблюдается особый, ферромагнитный эффект Холла. Для ферромагнетиков экспериментально найдено, что поле Холла

$$E_R = \mu_0 j (R_0 H + R_1 M), \qquad (30.1)$$

где H — напряженность магнитного поля; μ_0 — магнитная постоянная; M — намагниченность образца; j — плотность тока, протекающего через образец; R_0 и R_1 — обыкновенный и необыкновенный (аномальный) коэффициенты Холла.

Последнее соотношение с учетом равенства $B = \mu_0(H + M)$ можно записать в виде

$$\mathcal{E} = U_R\, d/I = R_0 B + R_S\, M\mu_0, \qquad (30.2)$$

где $\mathcal{E}$ — нормированное на полный ток I и толщину образца d измеряемое в эксперименте напряжение Холла U_R; $R_S = R_1 - R_0$ — так называемый спонтанный или ферромагнитный коэффициент Холла. Для большинства ферромагнитных металлов $R_S \approx R_1$.

Из этого выражения определяют коэффициенты Холла, используя экспериментальные зависимости $\mathcal{E}$ (B) (рис. 30.2).

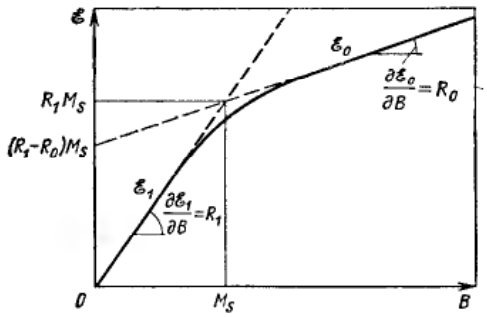


Рис. 30.2. Зависимость ЭДС Холла $\mathcal{E}$ от магнитной индукции для ферромагнитной пластинки. Определение обыкновенного R_0 и аномального R_1 коэффициентов Холла

Обычно $R_S \gg R_0$ и сильно зависит от температуры. С повышением температуры спонтанный коэффициент Холла R_S возрастает, достигая максимума в точке Кюри, а затем падает. В парамагнитной области температур эффект Холла определяется соотношением

$$\mathcal{E} = R^* H,$$

где $R^* = R_0 + \chi R_S = R_0 + R_P$, χ — магнитная восприимчивость вещества; R_P — парамагнитный коэффициент Холла — Кикоина.

Значения гальваномагнитных коэффициентов ферромагнитных металлов приведены в табл. 30.7.

Термомагнитные эффекты в ферромагнетиках определяются по формулам:

эффект Эттингсгаузена

$$\partial T_P / \partial y = (P_0 B + P_1 M\mu_0)\, j;$$

эффект Риги — Ледюка

$$\partial T_A / \partial y = (A_0 B + A_1 M\mu_0) \quad \partial T_A / \partial x;$$

эффект Нернста

$$\partial U_Q / \partial y = (Q_0 B + Q_1 M(\mu_0)).$$

Таблица 30.1. **Таблица перевода коэффициентов гальвано- и термомагнитных явлений из СИ в практическую систему**

Величина	Обозначение	Система СИ	Практическая система (внесистемные единицы)
Магнитная индукция	B	$\frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} = \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$	10^4 Гс
Коэффициент Холла	R	$\frac{\text{м}^3}{\text{К}} = \frac{\text{м}^3}{\text{А}\cdot\text{с}}$	$10^{-2}\frac{\text{В}\cdot\text{см}}{\text{А}\cdot\text{Гс}}$
Коэффициент Эттингсгаузена	P	$\frac{\text{К}\cdot\text{м}^3}{\text{В}\cdot\text{А}\cdot\text{с}}$	$10^{-2}\frac{\text{К}\cdot\text{см}}{\text{А}\cdot\text{Гс}}$
Коэффициент Риги—Ледюка	A	$\frac{\text{м}^2}{\text{В}\cdot\text{с}}$	10^{-4} Гс$^{-1}$
Коэффициент Нернста	Q	$\frac{\text{м}^2}{\text{К}\cdot\text{с}}$	$10^{-4}\frac{\text{В}}{\text{К}\cdot\text{Гс}}$

В ферромагнитных металлах зависимость ρ от напряженности магнитного поля также имеет ряд особенностей, которые обусловлены наличием в этих веществах самопроизвольной намагниченности. В больших магнитных полях (когда происходит техническое насыщение материала) сопротивление с ростом напряженности поля всегда уменьшается независимо от направления магнитного поля по отношению к току.

В таблицах и рисунках этой главы принято обозначение $RRR = \rho(300\ \text{K})/\rho(4{,}2\ \text{K})$. Этот параметр определяет чистоту образца.

Значения всех гальвано- и термомагнитных коэффициентов даны в СИ. Для перевода в другие системы единиц следует пользоваться табл. 30.1. Следует иметь в виду, что напряженность внешнего магнитного поля, равная в системе СГС 10 кЭ, соответствует индукции внешнего магнитного поля в системе СИ, $B \equiv \mu_0 H = 1$ Тл, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м $= 1{,}256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м — магнитная постоянная.

30.2. ТОПОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ФЕРМИ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.2 и на рис. 30.3—30.23 приведены сведения о топологии поверхности Ферми для различных металлов [1].

Таблица 30.2. **Топология поверхности Ферми металлов [1]**

Металл	Кристаллическая решетка	Топологический тип и другие сведения о поверхности Ферми
Алюминий	ГЦК	$n_1 \neq n_2$; $B < 3{,}0$ Тл, закрытая; $B > 3{,}0$ Тл, магнитный пробой, рис. 30.7
Бериллий	ГПУ	$n_1 = n_2$; $B < 5{,}0$ Тл, закрытая; $B > 5{,}0$ Тл, магнитный пробой в базисной плоскости, рис. 30.4
Ванадий	ОЦК	$n_1 \neq n_2$, рис. 30.17
Висмут	Ромбоэдрическая	$n_1 = n_2$, закрытая; рис. 30.23
Вольфрам	ОЦК	$n_1 = n_2$, закрытая; рис. 30.18
Гадолиний	ГПУ	—
Галлий	Объемноцентрическая орторомбическая	$n_1 = n_2$, открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси c, рис. 30.9
Графит		Закрытая — самопересечение,
Железо	ОЦК	$n_1 = n_2$; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров по осям [001]
Золото	ГЦК	$n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$, открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров по осям [111] (основное открытое направление) и осям [110] и [100] (вторичные открытые направления), рис. 30.13
Индий	Тетрагональная	$n_1 = n_2$, закрытая
Иттербий	ГЦК	Закрытая
Иттрий	ГПУ	Открытая (расчет)
Кадмий	ГПУ	$n_1 = n_2$, открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси [0001], рис. 30.14
Калий	ОЦК	$n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$; закрытая (сфера), рис. 30.3
Кальций	ГЦК	Открытая (расчет), рис. 30.6; подобна поверхности Ферми свинца (рис. 30.11)
Кобальт	ГЦК	Рис. 30.20
Литий	ОЦК	$n_1 \neq n_2$, закрытая (сфера)
Магний	ГПУ	$n_1 = n_2$, открытая, $B > 0{,}5$ Тл, магнитный пробой в плоскости [0001], рис. 30.5
Медь	ГЦК	$n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111]; подобна поверхности Ферми золота, рис. 30.13
Молибден	ОЦК	$n_1 = n_2$, закрытая, рис. 30.18
Мышьяк	Ромбоэдрическая	$n_1 = n_2$; закрытая, рис. 30.12

Металл	Кристаллическая решетка	Топологический тип и другие сведения о поверхности Ферми
Натрий	ОЦК	$n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$; закрытая — сфера (см. калий)
Никель	ГЦК	$n_1 = n_2$; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111]; подобна поверхности Ферми золота
Ниобий	ОЦК	$n_1 \neq n_2$; магнитный пробой, открытая — сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [001], [110] и [111], рис. 30.17
Олово	Тетрагональная	$n_1 = n_2$; открытая — плоская сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [010] и [110], рис. 30.10 $B > 5{,}0$ Тл, магнитный пробой
Осмий	ГПУ	$n_1 = n_2$; открытая — плоская сетка гофрированных цилиндров, параллельных плоскости [0001] и оси [0001], магнитный пробой
Палладий	ГЦК	$n_1 = n_2$; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [001], рис 30.22
Платина	ГЦК	$n_1 = n_2$; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [001]; подобна поверхности Ферми палладия
Рений	ГПУ	$n_1 = n_2$; открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси [0001]; $B > 3{,}0$ Тл, магнитный пробой; появляются дополнительные открытые направления вдоль осей [0001] и $[10\bar{1}0]$, рис. 30.19
Родий	ГЦК	Закрытая (расчет), рис. 30.21
Ртуть	Ромбоэдрическая	$n_1 = n_2$; открытая — открытые направления параллельны осям [100] и [011], рис. 30.16
Рубидий	ОЦК	$n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$; закрытая сфера (см. калий)
Рутений	ГПУ	Открытая, магнитный пробой
Свинец	ГЦК	$n_1 = n_2$; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111], рис. 30.11
Серебро	ГЦК	$n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$; открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [111]; подобна поверхности Ферми золота
Скандий	Полиморфная ГЦК, ГПУ	$n_1 \neq n_2$, закрытая
Стронций	Полиморфная	Открытая (расчет)
Сурьма	Ромбоэдрическая	$n_1 = n_2$, закрытая
Таллий	ГПУ	$n_1 \neq n_2$, открытая; две гофрированные плоскости [0001], соединенные узкими перемычками вдоль оси [0001]; рис. 30.8, $B > 3{,}0$ Тл; магнитный пробой
Тантал	ОЦК	$n_1 = n_2$, открытая — пространственная сетка гофрированных цилиндров вдоль осей [001]; подобна поверхности Ферми ниобия
Титан	ГПУ	$n_1 = n_2$, закрытая
Торий	Полиморфная	
Хром	ОЦК	$n_1 = n_2$, закрытая (см. рис. 30.18); в антиферромагнитном хроме $B > 6{,}0$ Тл, магнитный пробой вдоль [100]
Цезий	ОЦК	$n_1 = 1$ электрон/атом, $n_2 = 0$; закрытая — сфера (см. калий)
Цинк	ГПУ	$n_1 = n_2$, открытая — гофрированный цилиндр вдоль оси [0001]; рис. 30.15, $B > 0{,}25$ Тл; магнитный пробой, проявляются открытые направления вдоль осей $[1\bar{2}10]$ и $[10\bar{1}0]$
Цирконий	ГПУ	Открытая (расчет)
AuSn	Гексагональная	Открытая
$AuAl_2$	ГЦК	Открытая, аналогична по топологии поверхности Ферми золота
AgZn, CuZn, PdIn	β-латунь	Открытые (расчет)
$AuGa_2$, $AuIn_2$	ГЦК	Открытые, аналогичны по топологии поверхности Ферми золота
$MgZn_2$	Гексагональная	

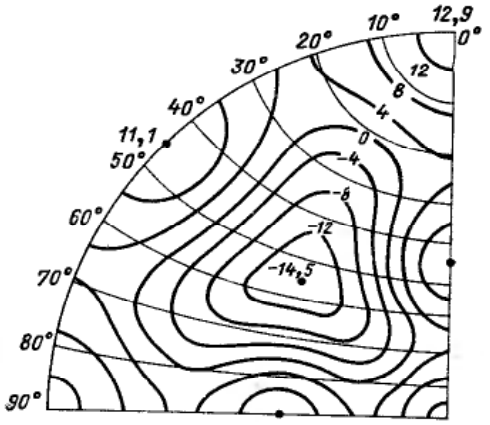


Рис. 30.3. Поверхность Ферми для K [2]. Проведены контуры отклонения поверхности Ферми от сферы в единицах $10^4\ \Delta r/r_1$, где r — радиус сферы. (Значения $\Delta r/r$ для других щелочных металлов качественно такие же)

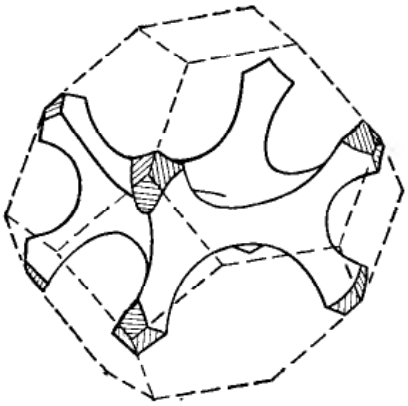


Рис. 30.6. Многосвязная дырочная поверхность Ферми для Ca в первой зоне (Модель Харрисона) [2]

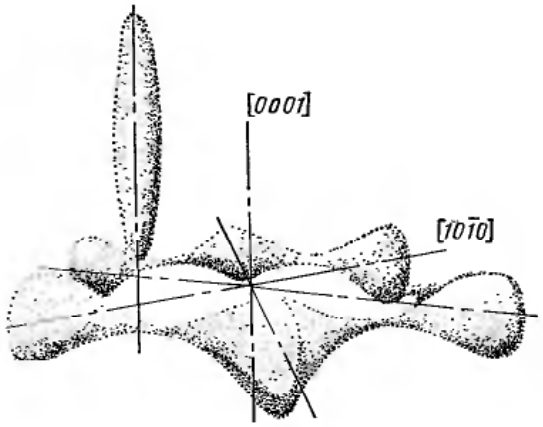


Рис. 30.4. Поверхность Ферми для Be («сигара» и «корона») [2]

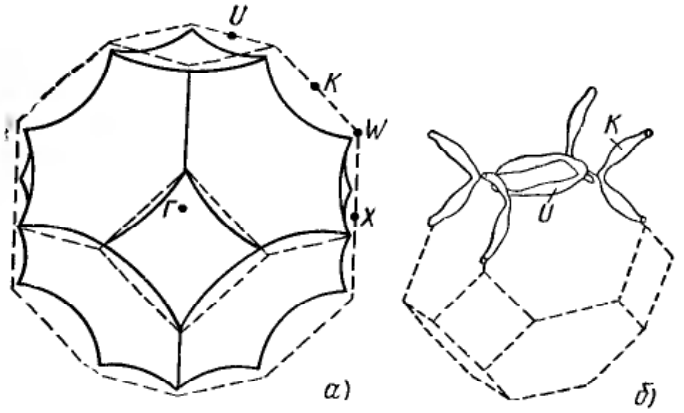


Рис. 30.7. Дырочная поверхность Ферми для Al во второй зоне [3] (*а*) и электронная поверхность Ферми для Al в третьей зоне (модель Ашкрофта) [2] (*б*)

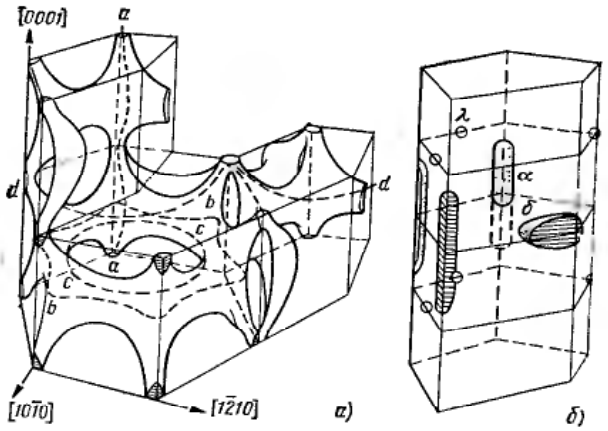


Рис. 30.5. Поверхность Ферми для Mg:
а — многосвязная дырочная поверхность во второй зоне [6]; *б* — электронная поверхность в третьей и четвертой зонах [2]

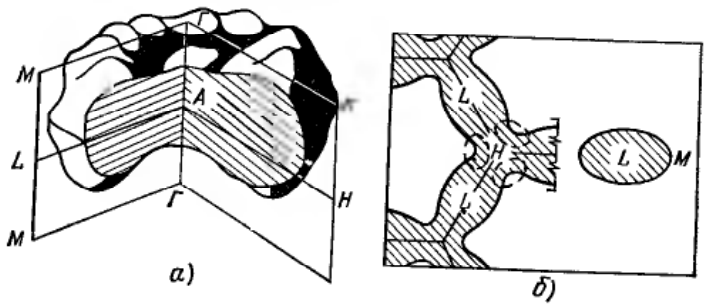


Рис. 30.8. Поверхность Ферми в третьей зоне для Tl [2] (*а*) и поперечное сечение поверхности Ферми плоскостью *AHL* [2] в четвертой зоне для Tl (*б*)

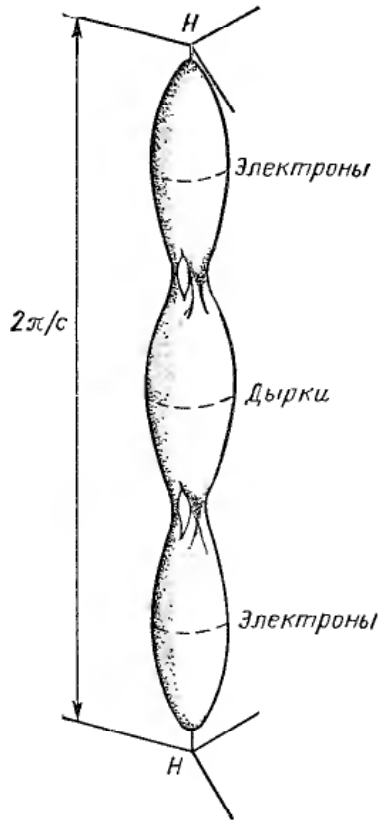


Рис. 30.9. Поверхность Ферми для графита (Модель Макклура) [2]

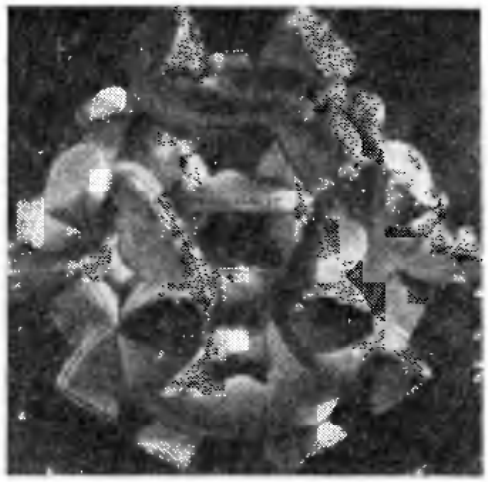


Рис. 30.11. Открытая электронная поверхность Ферми для Pb (третья зона) [1]

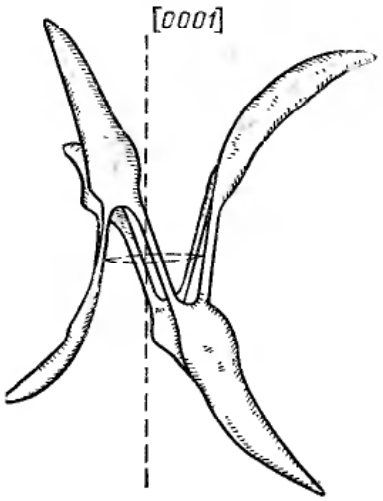


Рис. 30.12. Дырочная поверхность Ферми для As [2]

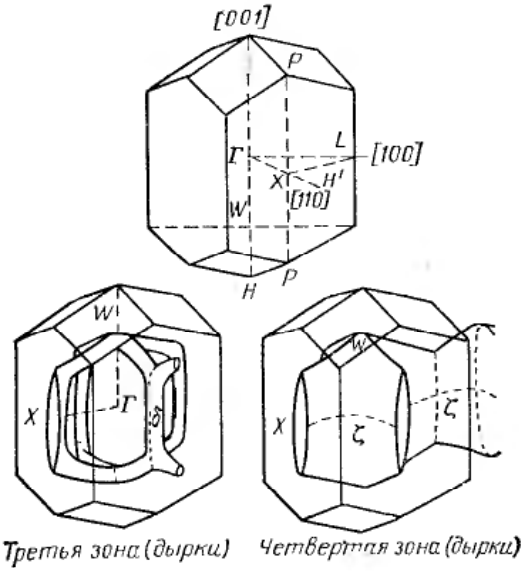


Рис. 30.10. Зона Брюллюэна и дырочные открытые поверхности Ферми для Sn [1]

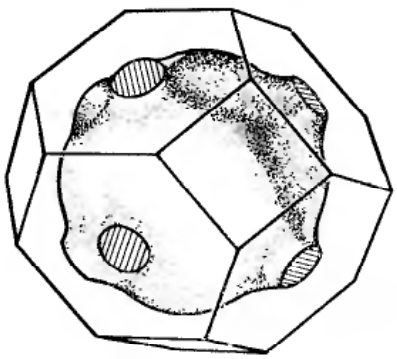


Рис. 30.13. Поверхность Ферми для Cu, Au и Ag [6]

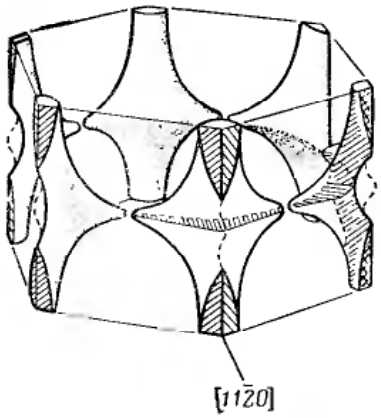


Рис. 30.14. Открытая поверхность Ферми для Cd [1]

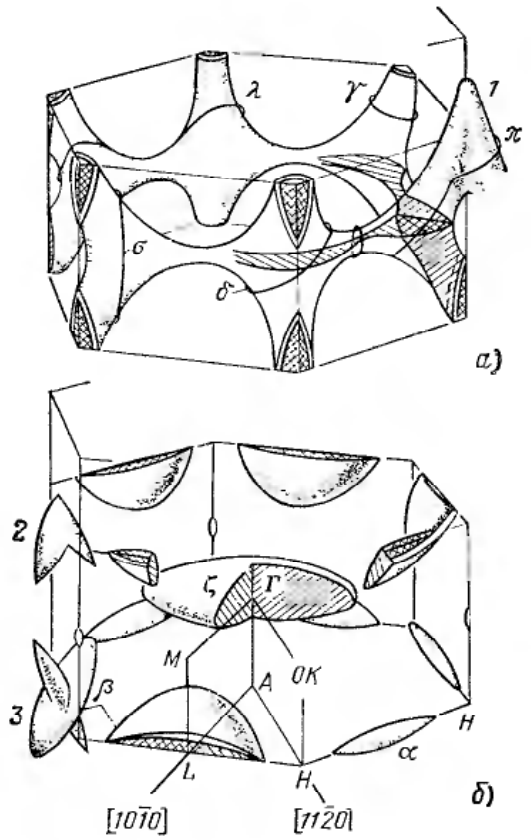
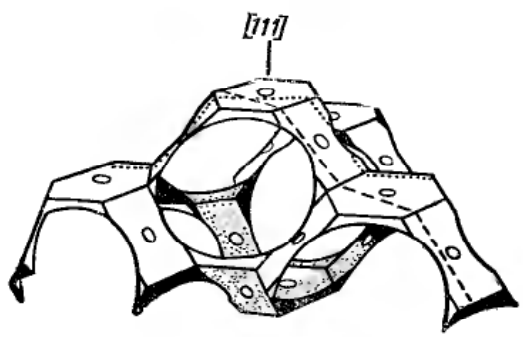


Рис. 30.15. Поверхности Ферми для Zn [1]:

а — открытая дырочная поверхность (вторая зона) (карманы в первой зоне выделены поперечной штриховкой); *б* — электронная поверхность в третьей и четвертой зонах (сигары в четвертой зоне поперечно заштрихованы)



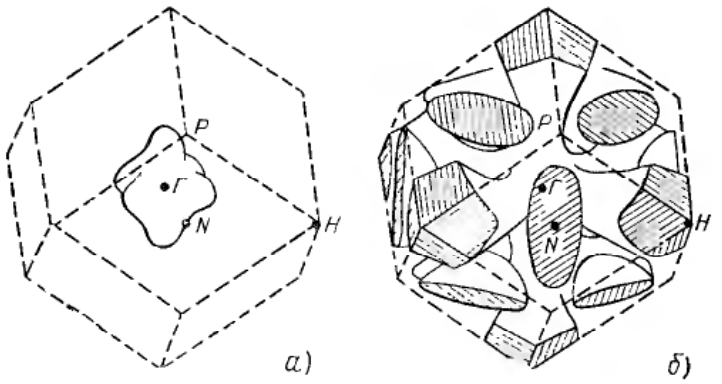


Рис. 30.17. Поверхность Ферми для металлов V группы (V, Nb и Ta) (модель Маттхейса) [2]

а — замкнутая дырочная поверхность в точке Г; *б* — «игрушечные джунгли» из дырочных трубок и дырочные эллипсоиды в азоте

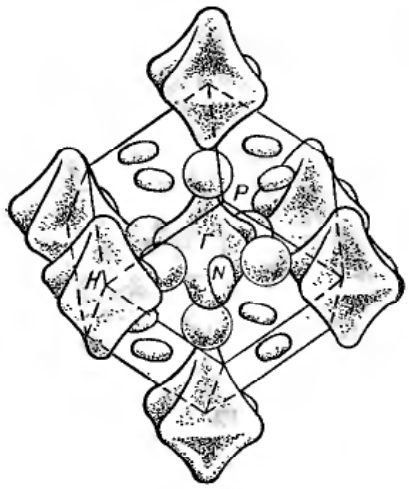


Рис. 30.18. Поверхность Ферми для металлов Mo, W и парамагнитного Cr [2] (модель Ломера)

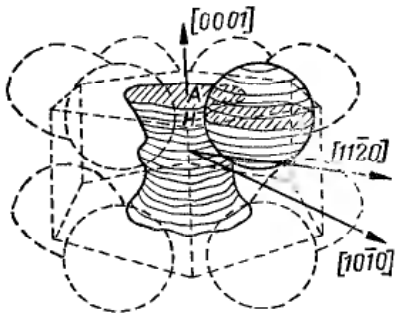


Рис. 30.19. Поверхность ферми Re; дырочная поверхность в седьмой зоне (замкнутая, пунктир) и открытая электронная в восьмой зоне [2]

Рис. 30.16. Открытая многосвязная дырочная поверхность Ферми для Hg в первой зоне [1]

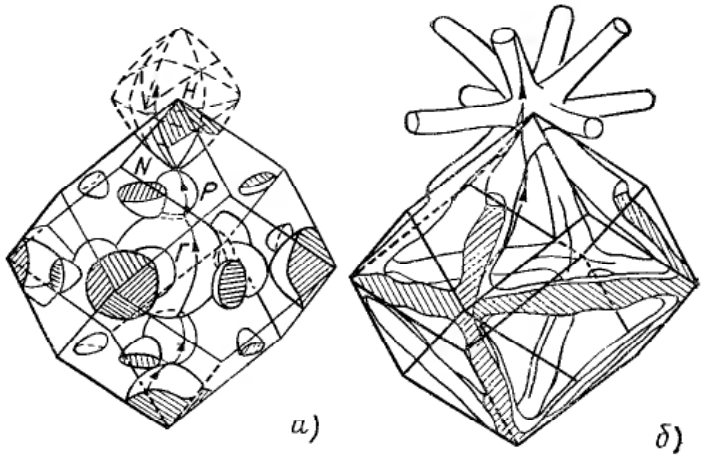
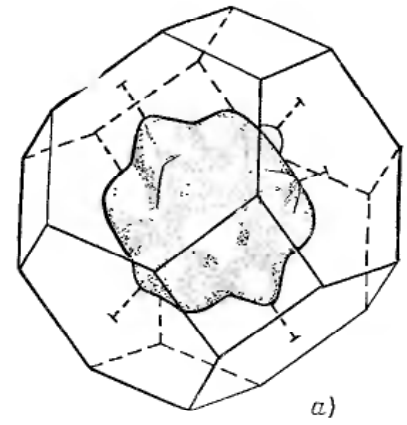


Рис. 30.20. Поверхность Ферми для Co (теоретическая модель) [2]:
а — дырочная поверхность со спином «вниз»; *б* — дырочная поверхность со спином «вверх»



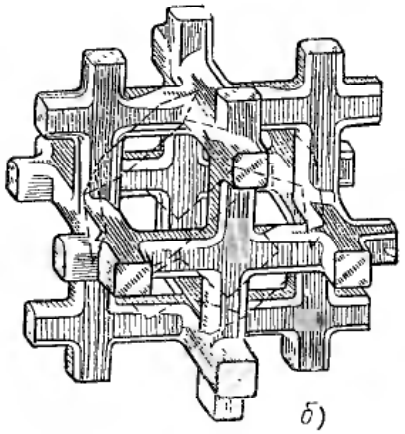


Рис. 30.22. Поверхность Ферми для Pd [2]:
а — электронная поверхность в Г; *б* — многосвязанные дырочные трубки

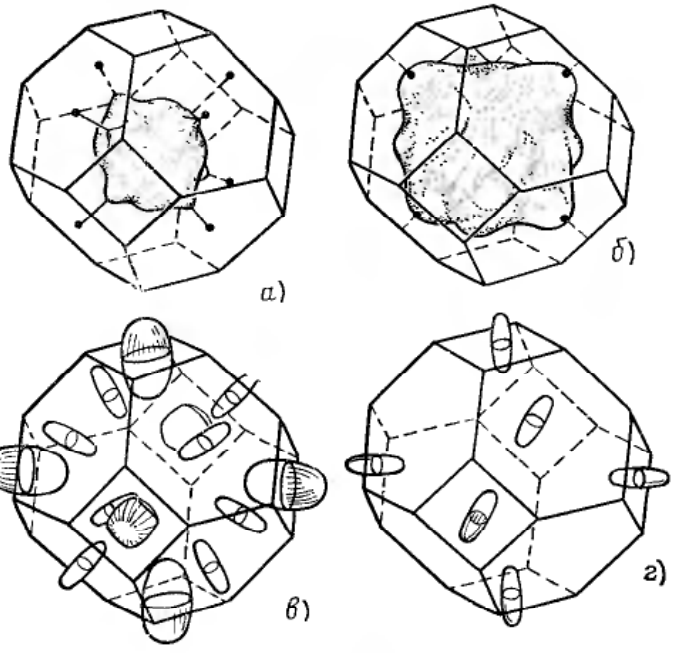


Рис. 30.21. Модель поверхности Ферми для Rh [2]:
а и *б* — электронные поверхности; *в* и *г* — дырочные карманы

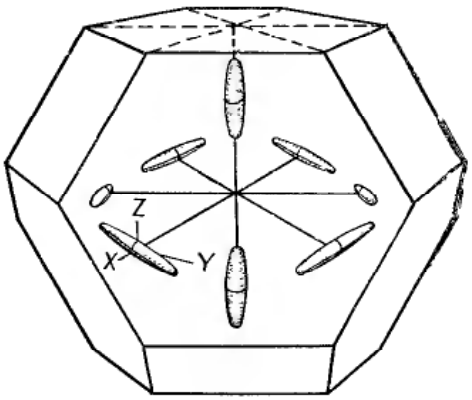


Рис. 30.23. Поверхность Ферми длля Bi [3]

30.3. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.3, 30.4 и на рис. 30.24—30.53 приведены данные, характеризующие влияние магнитного поля на электрическое сопротивление различных металлов.

Таблица 30.3. **Изменение электрического сопротивления чистых металлов в магнитном поле** $\Delta\rho/\rho_\perp$, если $\mathbf{B} \perp \mathbf{I}$, $\Delta\rho/\rho_\parallel$, если $\mathbf{B} \parallel \mathbf{I}$. В таблице представлены значения $\Delta\rho/\rho_\perp$, кроме специально отмеченных случаев

Материал, чистота	RRR	T, K	B, Тл	$\Delta\rho/\rho$		Литература
				$\Delta\rho/\rho_\perp$	$\Delta\rho/\rho_\parallel$	
Алюминий (99,999 %)	15 000	19,6	4,0	5,0	2,2	[8]
	15 000	4,0	4,0	2,4	1,5	[8]
	28 200	19,6	2,0	3,1	—	[8]
	4000	4,2—70	3,8	См. рис. 30.25		[9]
Барий	140	20,4	3,32	0,41		[10]
	140	14,0	3,32	3,08		[10]
Бериллий поликристаллический	30	291	30,4	0,66		[11]
	30	78	30,4	2,28		[11]
Бериллий монокристаллический	40—90	4,2	3—7,0	См. рис. 30.26		[12]
Висмут поликристаллический	—	291	30,0	37		[11]
	—	80	30,0	1360		[11]
Висмут монокристаллический	—	14; 4,2		См. рис. 30.27		[13]
Вольфрам	—	78	30,0	0,938		[11]
Вольфрам монокристаллический	13 500	4,2		См. рис. 30.28		[14]
Галлий поликристаллический 99,7 %	—	195	30,0	0,173		[11]
Галлий монокристаллический 99,999 %	$25 \cdot 10^3$	4,2	2,0	$24 \cdot 10^4$	$\mathbf{I} \parallel a$, $\mathbf{B} \parallel c$	[15]
				$6 \cdot 10^4$	$\mathbf{I} \parallel a$, $\mathbf{B} \parallel b$, $\mathbf{B} \parallel c$	[15]
Графит монокристаллический 99,995 %	—	4,2	16,0	$14 \cdot 10^3$		[16]
	—	4,2	10,0	$9{,}5 \cdot 10^3$		[16]
	—	4,2	2,0	$1{,}5 \cdot 10^3$		[16]
Европий монокристаллический 99,9 %	—	4,2	2,0	0,16		[17]
	—	4,2	4,0	0,33		[17]
	—	4,2	8,0	0,58		[17]
Золото поликристаллическое 99,999 %	—	79	4,0	0,018		[18]
Золото монокристаллическое 99,999 %	1600	4,2	3,0	См. рис. 30.29		[19]
Индий поликристаллический	—	165	30,0	0,03		[11]
	—	80	30,0	0,14		[11]
Индий монокристаллический	12 000	4,2	3,5	См. рис. 30.30		[20]
Кадмий поликристаллический	—	291	30,0	0,08		[11]
	—	78	30,0	0,927		[11]
				$\Delta\rho/\rho_\perp$	$\Delta\rho/\rho_\parallel$	
То же	200	4,2	1,6	26	0,05	[21]
Кадмий монокристаллический	1000	4,2	1,6	100	10	[21]
Калий монокристаллический 99,95 %	3400	4,2	5,5	0,38 при $\mathbf{B} \parallel [100]$		[22]
	3400	4,2	5,5	0,22 при $\mathbf{B} \parallel [110]$		[22]
Литий	985	4,2	0,829	0,978	—	[23]
»	985	77	1,43	0,155	—	[23]
»	985	4,2	1,60	—	0,975	[23]
»	985	77	1,49	—	0,07	[23]
			См. рис. 30.31			
Магний поликристаллический	—	291	30,0	0,167		[11]
То же	—	78	30,0	2,82		[11]
Магний монокристаллический	230—610	4,2	2,5	См. рис. 30.32		[24]
Медь поликристаллическая	—	78	30,0	0,429		[11]
Медь монокристаллическая	480—630	4,2—70	3,8	См. рис. 30.25		[9]

Материал, чистота	RRR	T, K	B, Тл	$\Delta\rho/\rho$	Литература
Молибден поликристаллический	—	195	30,0	0,095	[11]
То же	—	78	30,0	0,915	[11]
Молибден монокристаллический	1000	4,2	2,5	См. рис. 30.33	[25]
Натрий поликристаллический	—	80	30,0	0,07	[11]
То же	5000	4,2	0,9	0,399	[26]
				$\Delta\rho/\rho_\perp$ | $\Delta\rho/\rho_\parallel$	
Неодим 99,9 %	—	1,4	0,5	0,04 | —0,13	[27]
То же	—	4,2	0,5	0,02 | —0,05	[27]
»	—	14,0	0,5	—0,015 | —0,04	[27]
«	—	20,4	0,5	0,010 | —0,02	[27]
Неодин 99,8 %	—	4,2	8,0	См. рис. 30.34	[17]
Олово поликристаллическое	—	291	30,0	0,02	[11]
	—	80	30,0	0,23	[11]
« монокристаллическое	10 000	4,2	2,0	См. рис. 30.35	[28]
				$\Delta\rho/\rho$ | φ*	
Осмий монокристаллический, ось образца вдоль $[11\bar{2}0]$	—	4,2	8,0	18 | 185	[29]
То же	—	4,2	8,0	16 | 170	[29]
»	—	4,2	8,0	4 | 100	[29]
»	—	4,2	8,0	2,7 | 80	[29]
Палладий поликристаллический	—	78	30,0	0,102	[11]
Палладий монокристаллический	1730	4,2	1,0	См. рис. 30.36	[25]
Платина	—	78	30,0	0,102	[11]
»	2400	4,2	2,0	См. рис. 30.37	[24]
Празеодим	—	4,2	8,0	$\Delta\rho/\rho_\parallel = 0{,}04$	[17]
Рений 99,6 %	—	80	3,43	0,0196	[30]
Рений монокристаллический	1600	4,2	3,43	См. рис. 30.38	[31]
Родий поликристаллический	—	20,4	3,6	1,546	[32]
То же	—	4,2	3,7	1,867	[32]
				$\Delta\rho/\rho_\perp$ | $\Delta\rho/\rho_\parallel$	
Рубидий	300	4,2	2,55	0,36 | 0,117	[33]
Рутений монокристаллический	100	4,2	4,0	0,87 при $\begin{cases} \mathbf{I} \parallel [1000] \\ \mathbf{B} \parallel [1120] \end{cases}$	[34]
То же	100	4,2	4,0	0,75 при $\begin{cases} \mathbf{I} \parallel [1000] \\ \mathbf{B} \parallel [1010] \end{cases}$	[34]
»	100	4,2	4,0	0,59 при $\begin{cases} \mathbf{I} \parallel [1120] \\ \mathbf{B} \parallel [1110] \end{cases}$	[34]
»	100	4,2	4,0	0,53 при $\begin{cases} \mathbf{I} \parallel [1120] \\ \mathbf{B} \parallel [1000] \end{cases}$	[34]
Самарий 99,9 %	—	4,2	0,5	—2	[17]
То же	—	4,2	4,0	5	[17]
»	—	4,2	6,0	12	[17]
»	—	4,2	8,0	17	[17]
Свинец поликристаллический 99,999 %	—	291	30,0	$<0{,}01$	[18]
То же	—	80	30,0	0,05	[18]
»	17 000	4,2	2,28	417	[35]
»	17 000	1,86	2,28	4810	[35]
Свинец монокристаллический	10 000	4,2	2,4	См. рис. 30.39	[28]
Серебро поликристаллическое	—	78	30,0	0,376	[11]
То же	1000	4,2	2,4	См. рис. 30.40	[36]
Сурьма поликристаллическая	—	291	30,0	3,5	[11]
То же	—	80	30,0	40,0	[11]

Материал, чистота	RRR	T, К	B, Тл	$\Delta\rho/\rho$	Литература
Таллий поликристаллический	—	80	30,0	0,159	[11]
То же	100 000	4,2	13,0	См. рис. 30.41	[37]
Тантал поликристаллический	—	291	30,0	0,001	[11]
То же	—	80	30,0	0,01	[11]
Хром поликристаллический	—	291	30,0	0,03	[11]
То же	—	78	30,0	4,36	[11]
Цезий поликристаллический	—	20,4	4,0	0,03	[38]
Цинк поликристаллический	—	291	30,0	0,06	[11]
	—	78	30,0	0,927	[11]
Цинк монокристаллический 99,999 %	20 000	4,2	1,8	См. рис. 30.42	[39]
Цирконий поликристаллический	—	195	30,0	0,01	[11]
То же	—	80	30,0	0,05	

* φ — угол между направлением **B** и осью $[1\bar{1}20]$.

Таблица 30.4. **Изменение электросопротивления ферромагнитных металлов в магнитном поле**

Материал, чистота	RRR	T, К	$\mu_0 H$, Тл	$\Delta\rho/\rho$	Литература
Гадолиний поликристаллический 99,9%	—	4,2—350	1,6	См. рис. 30.43	[40]
Гадолиний монокристаллический	—	205	1	0,015 при $\begin{cases}\mathbf{B}\parallel c\\ \mathbf{I}\parallel b\end{cases}$	[40]
То же	—	205	1	$-0{,}01$ при $\begin{cases}\mathbf{B}\parallel b\\ \mathbf{I}\parallel b\end{cases}$	[40]
				См. рис. 30.44	[41]
Гольмий поликристаллический 99,9 %	16	4—130	2,0	См. рис. 30.45	[42]
Диспрозий поликристаллический 99,5 %	—	93	0,8	$-0{,}02$ $\mathbf{I}\parallel b$, $\mathbf{B}\parallel a$	[43]
	—	60—180	1,5	См. рис. 30.46	[43]
				$\Delta\rho/\rho_\parallel$ | $\Delta\rho/\rho_\perp$	
Железо монокристаллическое, вискер	260	300	0,1	$9\cdot10^{-4}$ | $-2\cdot10^{-4}$ $\begin{cases}\mathbf{I}\parallel[100]\\ \mathbf{B}\parallel[100]\end{cases}$	[44]
То же	260	300	0,1	$0{,}36\cdot10^{-2}$ | $-3\cdot10^{-4}$ $\begin{cases}\mathbf{I}\parallel[111]\\ \mathbf{B}\parallel[111]\end{cases}$	[44]
				См. рис. 30.47, 30.48	
Кобальт монокристаллический, вискер	460	4,2	15	См. рис. 30.49	[45]
Кобальт поликристаллический 99,25 %	—	200—600 °C	0,2	См. рис. 30.50	[46]
	—	300	—	$18\cdot10^{-4}$	[47]
				$\Delta\rho/\rho_\parallel$ | $\Delta\rho/\rho_\perp$	
Никель	—	300	1,6	$15\cdot10^{-3}$ | $-15\cdot10^{-3}$	[47]
Никель поликристаллический	—	300	0—1,8	См. рис. 30.51	[47]
Никель монокристаллический	—	300—660	1,0	См. рис. 30.52	[48]
				$\Delta\rho/\rho_\parallel$ | $\Delta\rho/\rho_\perp$	
Тербий поликристаллический 99,5 %	—	220	1,5	$-0{,}02$ | $-0{,}018$	[49]
То же	—	80—240	1,4	См. рис. 30.53	[49]

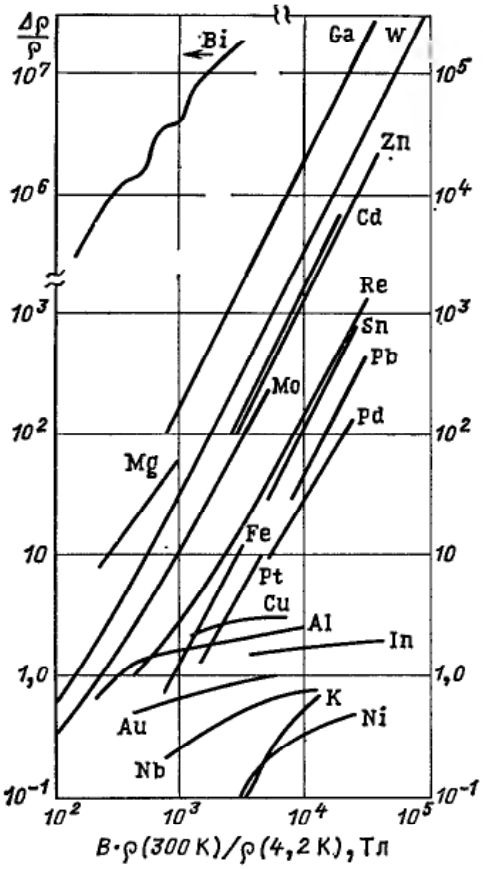


Рис. 30.24. Приведенная диаграмма Колера: зависимость $\Delta\rho/\rho$ от $B\cdot\rho$ (300 К)/ρ (4,2 К) для ряда металлов [5]

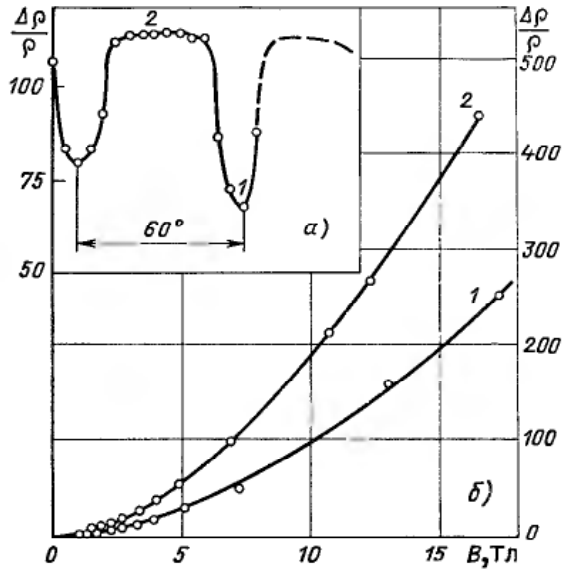


Рис. 30.26. Анизотропия $\Delta\rho/\rho$ для гексагонального образца Be [12] (*а*) (RRR=88; T=4,2 К; B=7,0 Тл; φ — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец) и зависимость $\Delta\rho/\rho$ для Be от магнитной индукции (*б*) в направлениях минимума (1), максимума (2) угловой диаграммы (*а*) (см. п. 3, с. 738)

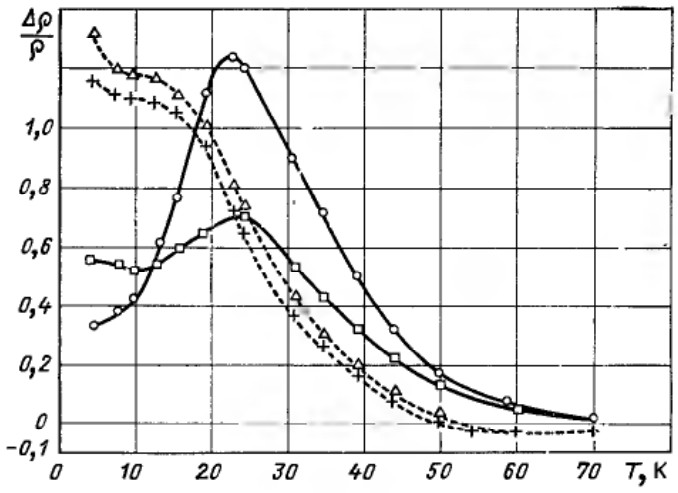


Рис. 30.25. Температурная зависимость $\Delta\rho/\rho$ для поликристаллических образцов Al и Cu в магнитном поле B=3,8 Тл [9]:
для Al: ○ — RRR=4000; □ — RRR=1875; для Cu: △ — RRR=480; + — RRR=480

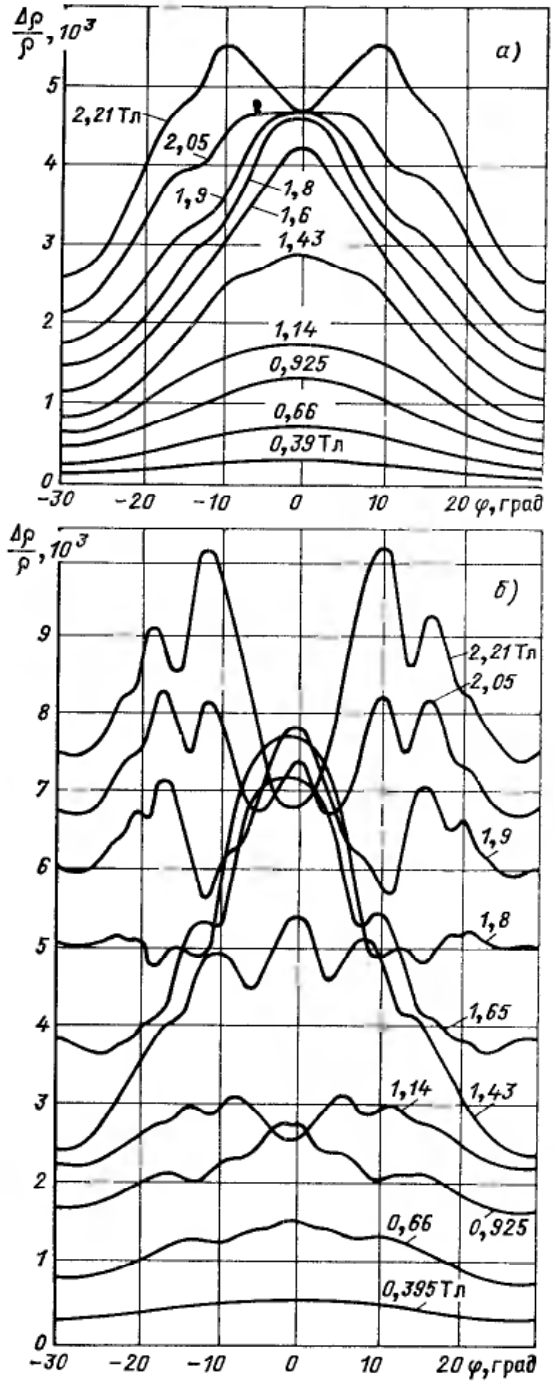


Рис. 30.27. Зависимость $\Delta\rho/\rho$ для монокристалла Bi от ориентации магнитного поля относительно бинарной оси при температуре 14 К (*а*) и 4,22 К (*б*) [13] (главная ось параллельна направлению тока)

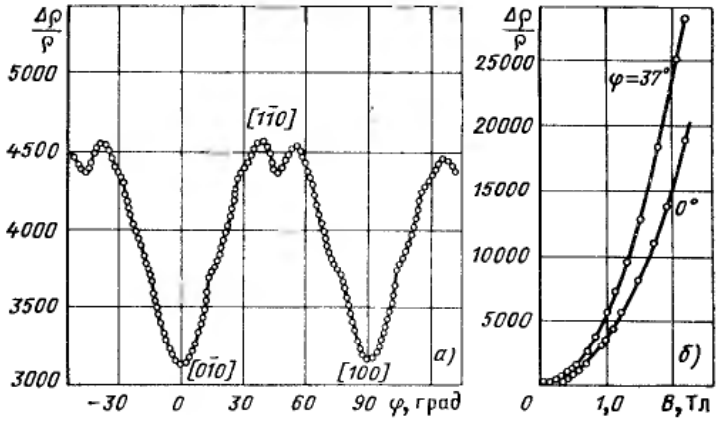


Рис. 30.28. Анизотропия $\Delta\rho/\rho$ монокристалла W [14] (RRR=13 000; T=4,2 К; B=0,9 Тл; плоскость вращения магнитного поля перпендикулярна к оси [001]; угол φ, определяющий направление поля в этой плоскости, отсчитывается от оси [010]) (*а*) и зависимость $\Delta\rho/\rho$ для *W* от магнитной индукции (*б*) в направлениях, соответствующих максимуму (φ=37°) и минимуму (φ=0°) угловой диаграммы на рис. *а* (см. п. 3, с. 738)

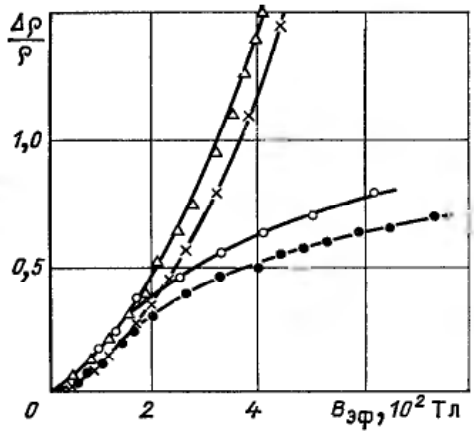
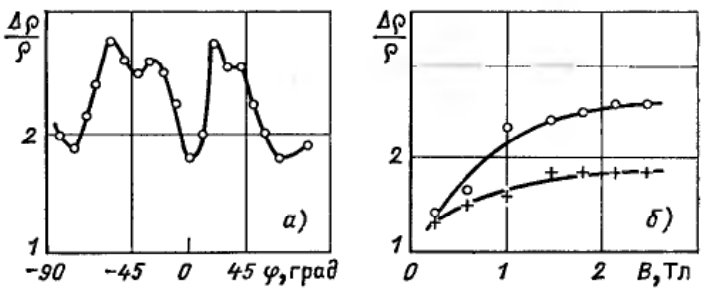


Рис. 30.29. Зависимость $\Delta\rho/\rho$ для монокристалла Au от эффективной магнитной индукции $B_{эф}=B\cdot\rho$ (300 К)/ /ρ (4,2 К) [19] (RRR=16 000):

● — в минимуме (φ=0°); × — в максимуме (φ= −75°) угловой диаграммы при T=4,2 К; ○ — в минимуме (φ=0°) и Δ — в максимуме (φ= −75°) при T=20,4 К; φ — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец (диаграмма вращения подобна диаграмме вращения Ag, см. рис. 30.40) (см. п. 2, с. 738)

Рис. 30.30. Анизотропия $\Delta\rho/\rho$ для монокристаллов In (*а*, [20]) (RRR=12 400; T=4,2 К; B=2,46 Тл; φ — угол между магнитным полем и направлением в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец) и зависимости $\Delta\rho/\rho$ для In от магнитной индукции (*б*) в направлениях минимума и максимума угловой диаграммы *а* (см. п. 1, с. 738)



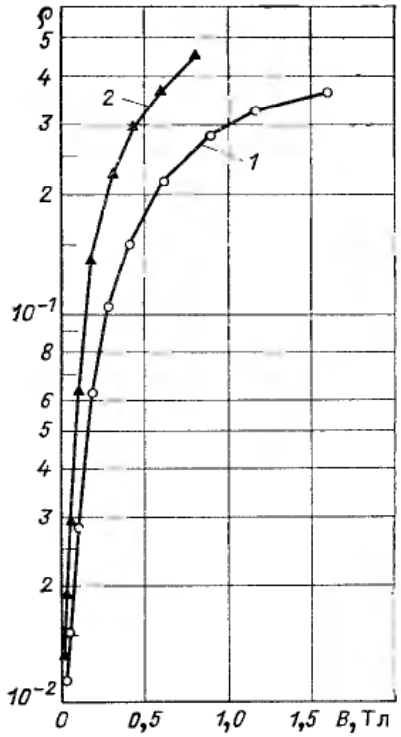


Рис. 30.31. Зависимость электросопротивления ρ поликристаллического образца Li от магнитной индукции при $T=4{,}2$ К [23]:

1 — B параллельна электрическому току через образец; *2* — B перпендикулярна электрическому току через образец

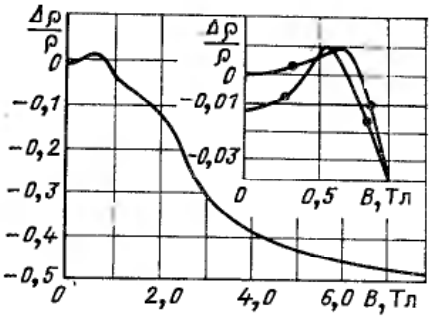


Рис. 30.34. Зависимость $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$ для Nd от магнитной индукции при $T=4{,}2$ К [17]

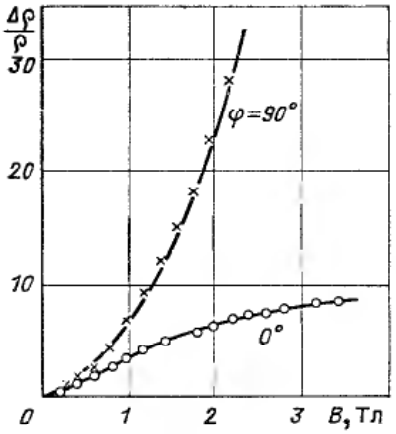
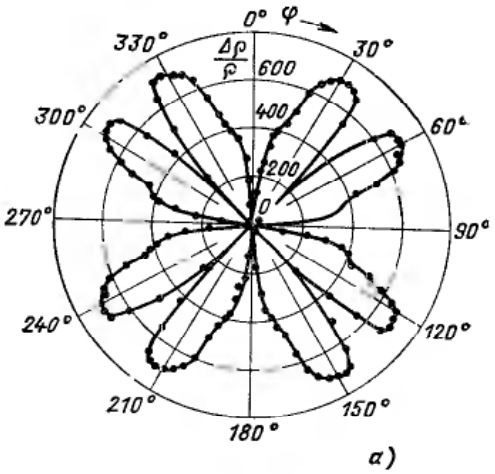
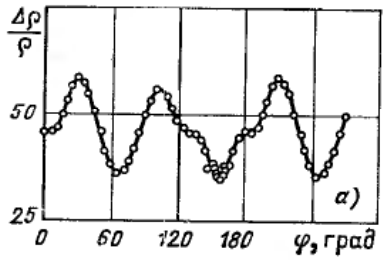


Рис. 30.32. Зависимости $\Delta\rho/\rho$ для монокристалла Mg от магнитной индукции для направлений максимума ($\varphi=90°$) и минимума ($\varphi=0°$) угловой диаграммы (при $T=4{,}2$ К) [24]; φ — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец; ось образца составляет 65° с осью [0001] (см. п. 4, с. 738)





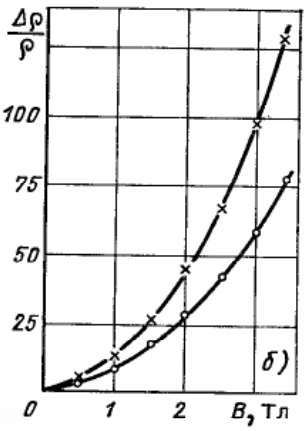


Рис. 30.33. Анизотропия $\Delta\rho/\rho$ для монокристалла Mo (*а*) [25] (RRR=1000; $T=4{,}2$ К; $B=2{,}3$ Тл; φ — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец. Ориентация кристалла $\theta=34°$, $\xi=°3$: θ и ξ — полярный и азимутальные углы осей образца относительно главных осей кристалла) и зависимость $\Delta\rho/\rho$ для Mo от магнитной индукции (*б*) в направлениях минимума и максимума угловой диаграммы *а* (см. п. 3, с. 738)

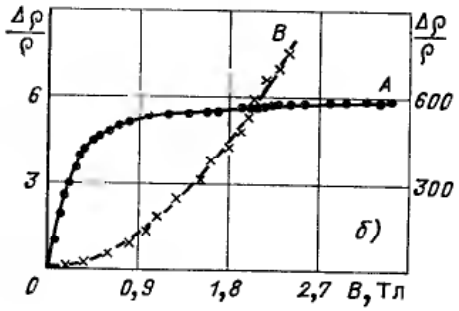


Рис. 30.35. Полярная диаграмма $\Delta\rho/\rho$ для монокристалла Sn (*а*) [28] ($T=4{,}2$ К; $B=2{,}3$ Тл; φ — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец, $\mathbf{I}\perp\mathbf{B}$, $\mathbf{I}\parallel[001]$) и зависимость $\Delta\rho/\rho$ для Sn от магнитной индукции (*б*) в направлениях минимума ($\varphi=0°$) и максимума ($\varphi=30°$) полярной диаграммы *а* (см. п. 4, с. 738)

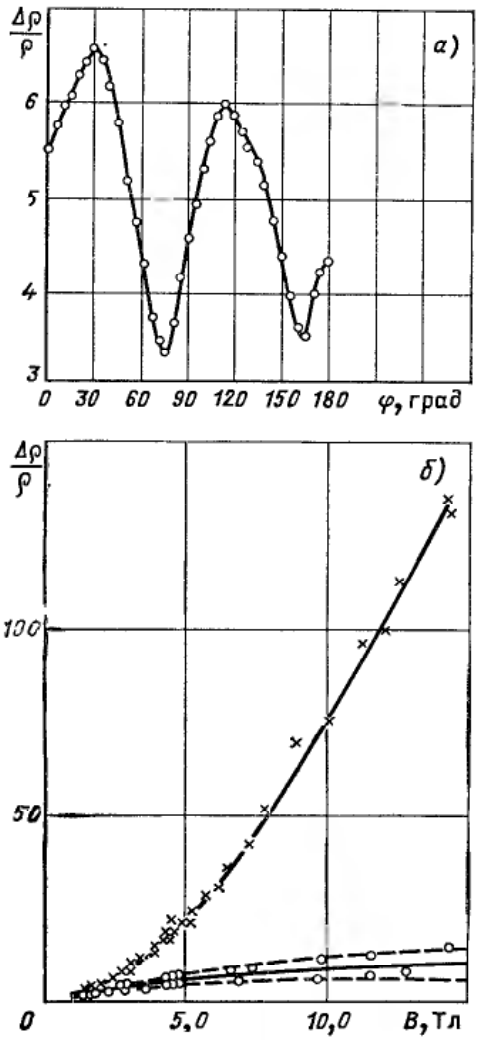


Рис. 30.36. Анизотропия $\Delta\rho/\rho$ для монокристалла Pd [25] (*а*) ($T=4{,}2$ К; $B=2{,}3$ Тл: φ — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец; ориентация кристалла $\theta=6°$, $\xi=27°$; θ и ξ — полярный и азимутальный углы осей образца относительно главных осей кристалла) и зависимость $\Delta\rho/\rho$ от магнитной индукции (*б*) в направлениях минимума и максимума угловой диаграммы *а* **(см. п. 2, с. 738)**

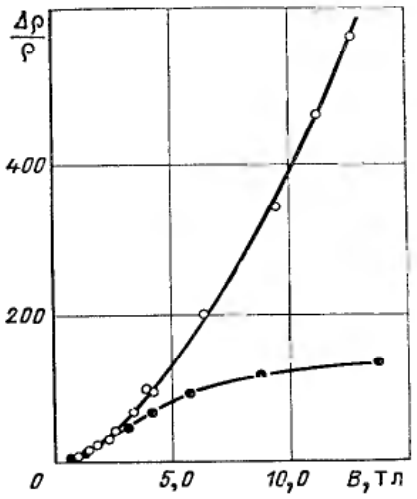


Рис. 30.38. Зависимость $\Delta\rho/\rho$ для Re от магнитной индукции ($T=4{,}2$ К) в направлениях максимума и минимума угловой диаграммы [31] (см. п. 4, с. 738)

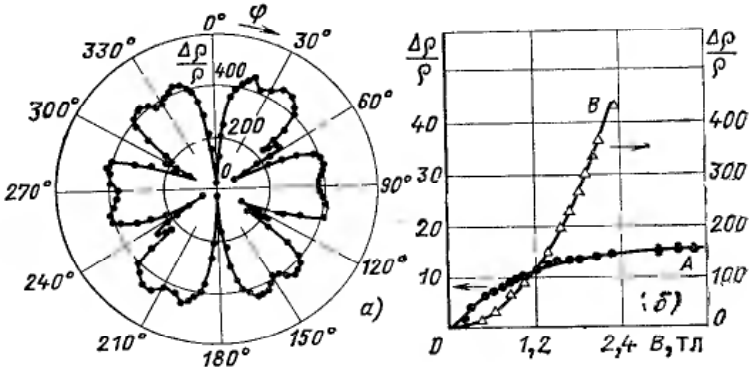


Рис. 30.39. Полярная диаграмма для монокристалла Pb (*а*) [28] (RRR=10 000; $T=4{,}2$ К; $B=2{,}23$ Тл; φ — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец; ось кристалла параллельна оси [111]) и зависимость $\Delta\rho/\rho$ для Pb от магнитной индукции (*б*) в направлениях минимума ($\varphi=0°$) и максимума ($\varphi=30°$) полярной диаграммы *а* (см. п. 4, с. 738)

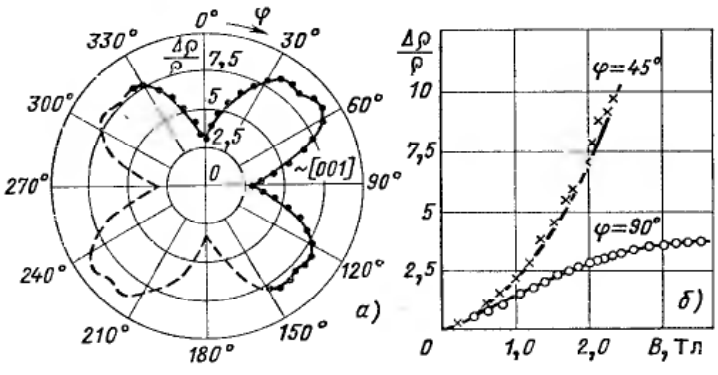


Рис. 30.37. Полярная диаграмма $\Delta\rho/\rho$ для монокристалла Pt [24] (RRR=1900; $B=2{,}35$ Тл; $T=4{,}2$ К; φ — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через кристалл) и зависимость $\Delta\rho/\rho$ для Pt от магнитной индукции (*б*) в направлениях минимума и максимума полярной диаграммы *а* (см. п. 4, с. 738)

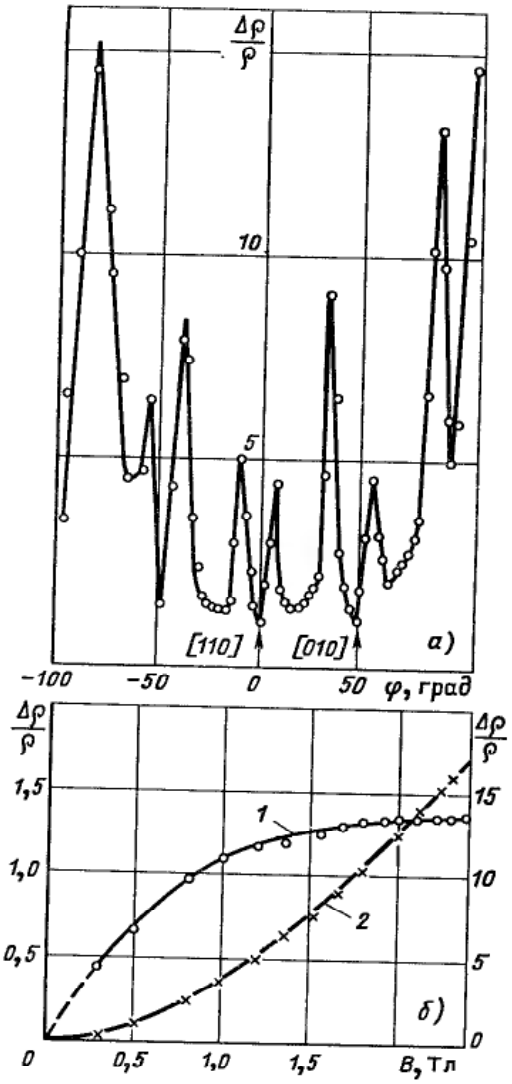


Рис. 30.40. Анизотропия $\Delta\rho/\rho$ для монокристалла Ag (*а*) [36] (RRR=1000; T=4,2 К; B=2,35 Тл; φ — угол поворота магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец, ось образца направлена по [001] с точностью ±5°) и зависимость $\Delta\rho/\rho$ для Ag от магнитной индукции (*б*) в направлениях минимума (φ=0°) и максимума (φ=80°) угловой диаграммы *а*: *1* — отсчет по левой шкале ординат; *2* — по правой (см. п. 2, с. 738)

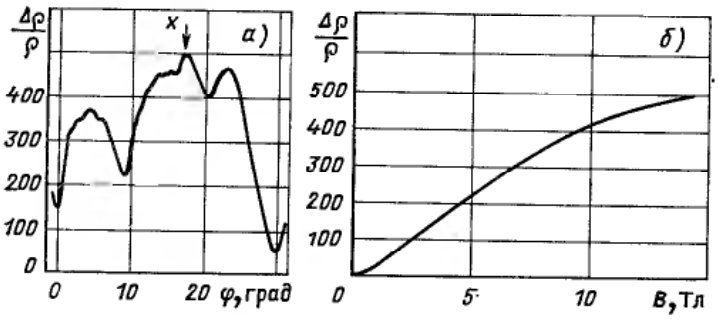


Рис. 30.41. Зависимость $\Delta\rho/\rho$ для моиокристалла Tl от угла между направлением магнитного поля в базисной плоскости и осью $[10\bar{1}0]$ кристалла (*а*) (T=4,2 К; B=13,4 Тл [37]) и от магнитной индукции (*б*) при T=4,2 К в направлении *x* на рис. *а* **(см. п. 4, с. 6)**

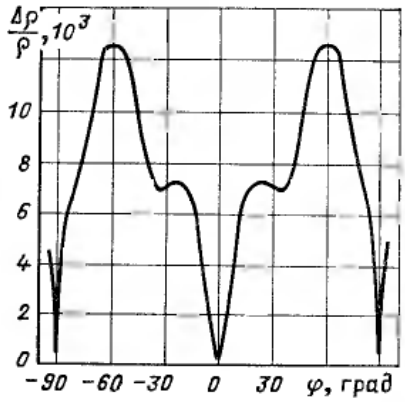


Рис. 30.42. Зависимость $\Delta\rho/\rho$ для монокристалла Zn от угла вращения магнитного поля [39] (RRR=20 000; T=4,2 К; B=1,8 Тл; **I** ∥ $[11\bar{2}0]$) поперечное вращение **B** в плоскости $(11\bar{2}0)$, **B** ∥ $[10\bar{1}0]$ при θ=0° (см. п. 4, с. 738)

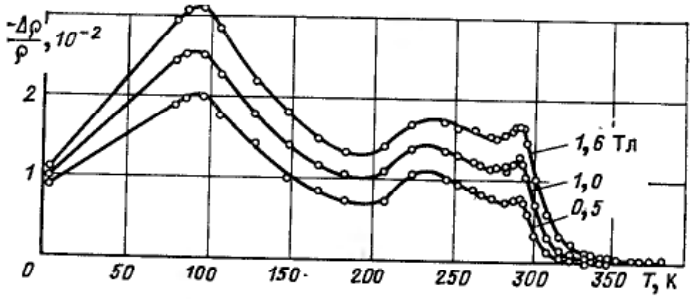


Рис. 30.43. Температурная зависимость $\Delta\rho/\rho$ для Gd [40] при различных значениях $\mu_0 H$

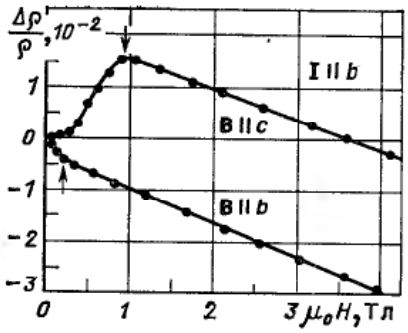
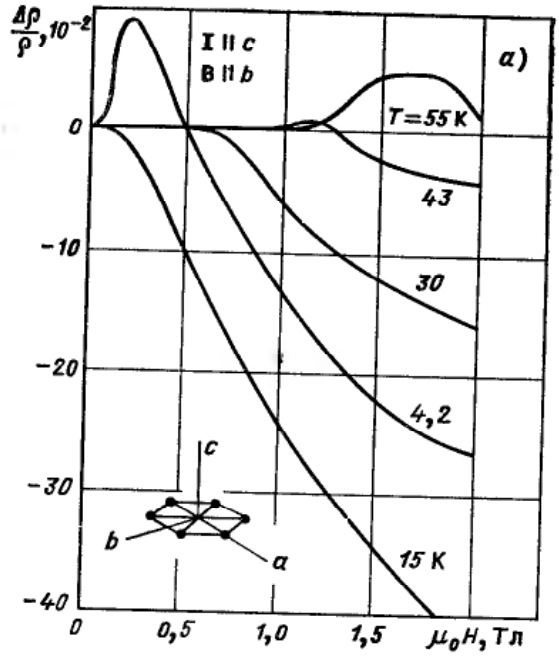


Рис. 30.44. Зависимость $\Delta\rho/\rho$ для Gd от $\mu_0 H$ при T= 205 К [41]



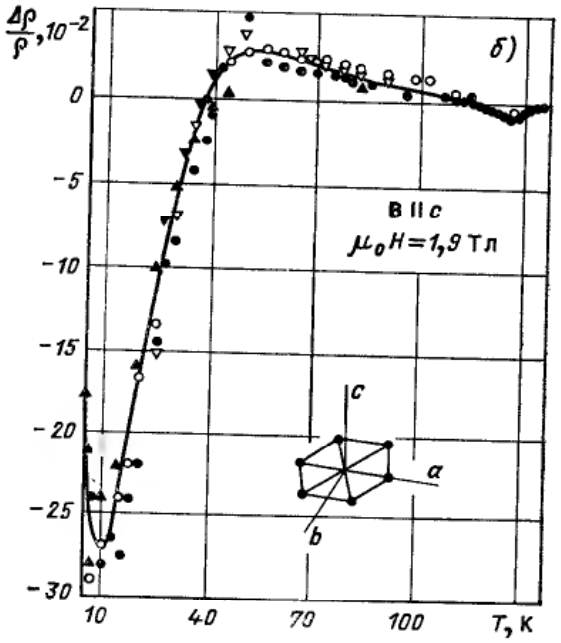


Рис. 30.45. Зависимость $\Delta\rho/\rho_{\perp}$ вдоль оси c от $\mu_0 H$ для монокристалла Ho при $B||b$ [42] ($а$) (те же результаты получаются, если $B||a$) и зависимость $\Delta\rho/\rho$ вдоль оси c от температуры ($б$) (различные точки относятся к разным циклам измерения)

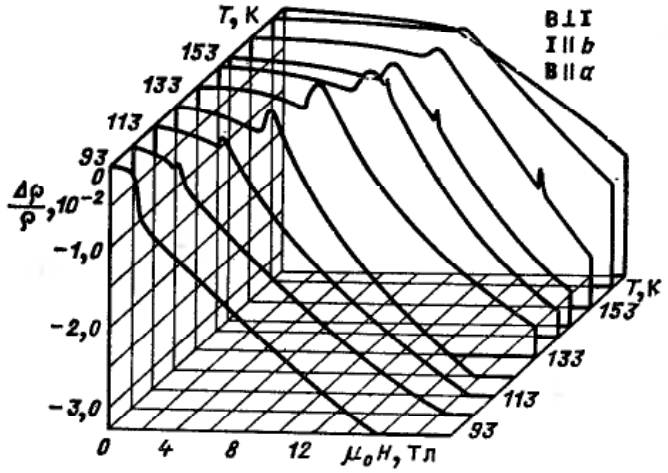


Рис. 30.46. Зависимость $\Delta\rho/\rho$ для Dy от $\mu_0 H$ при различной температуре [43]

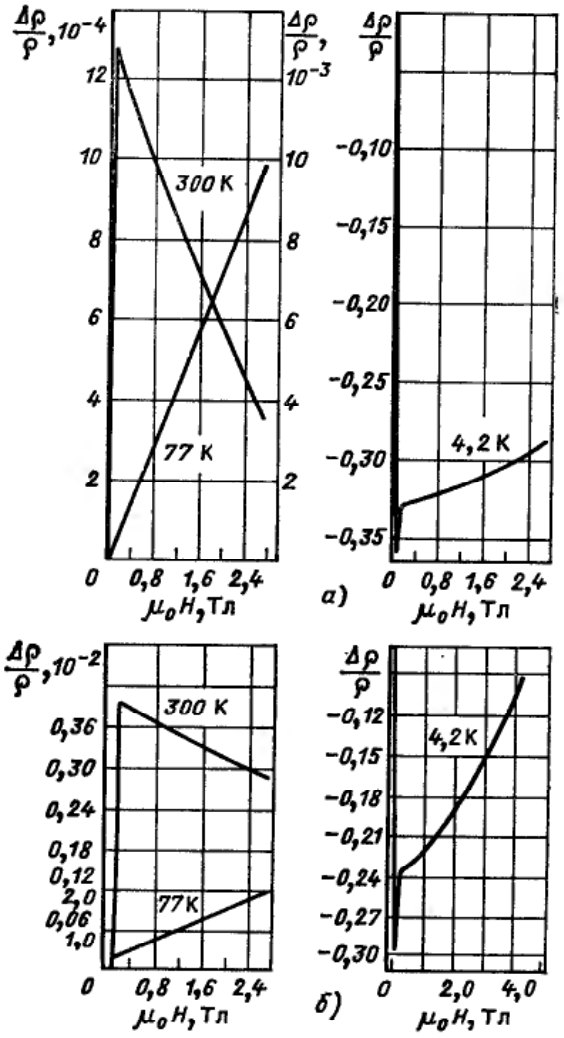
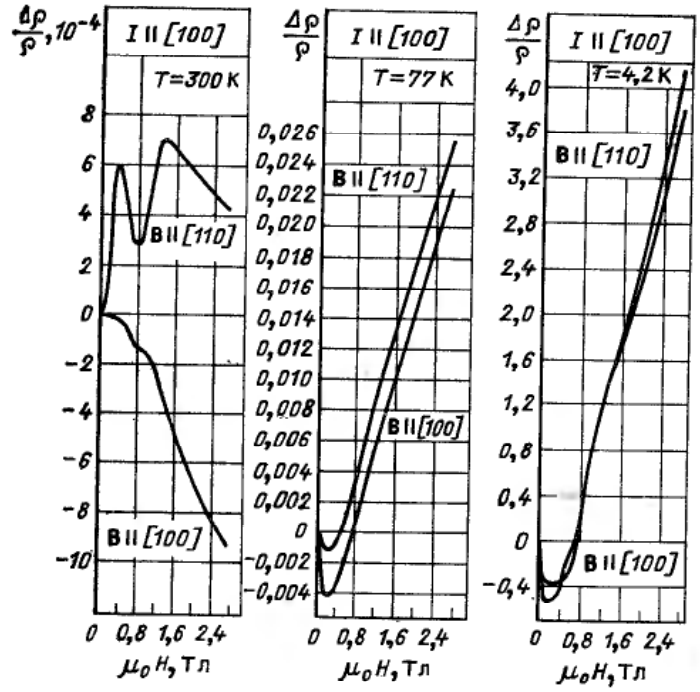


Рис. 30.47. Зависимость $\Delta\rho/\rho_{\parallel}$ для вискеров Fe от $\mu_0 H$ при температуре 300, 77 и 4,2 К [44]:
$а$ — вдоль оси [100] $B||[100]$ (⌀ 240 мкм, RRR=200); $б$ — вдоль оси [111] $B||[111]$ (⌀ 300 мкм, RRR=360)



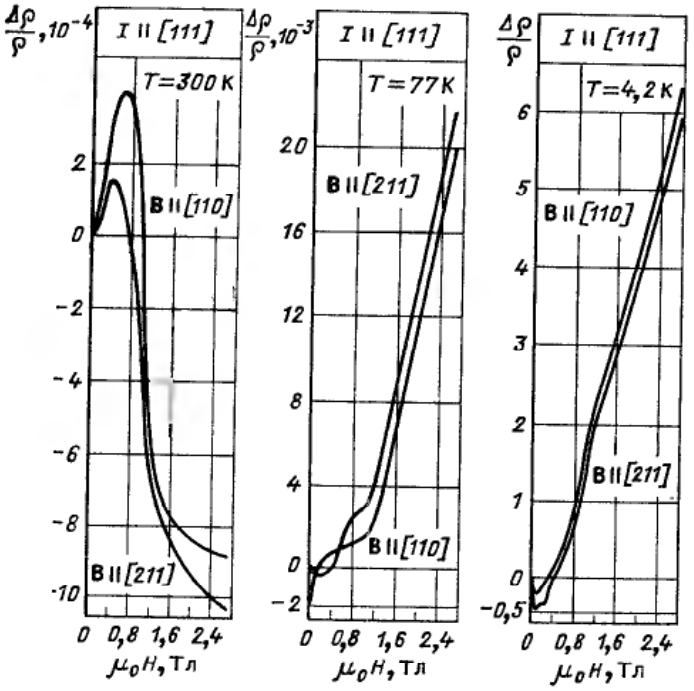


Рис. 30.48. Зависимость $\Delta\rho/\rho_\perp$ для тех же (см. рис. 30.47) вискеров Fe от $\mu_0 H$ при температуре 300, 77, 4,2 К и различных ориентациях кристаллов [44]

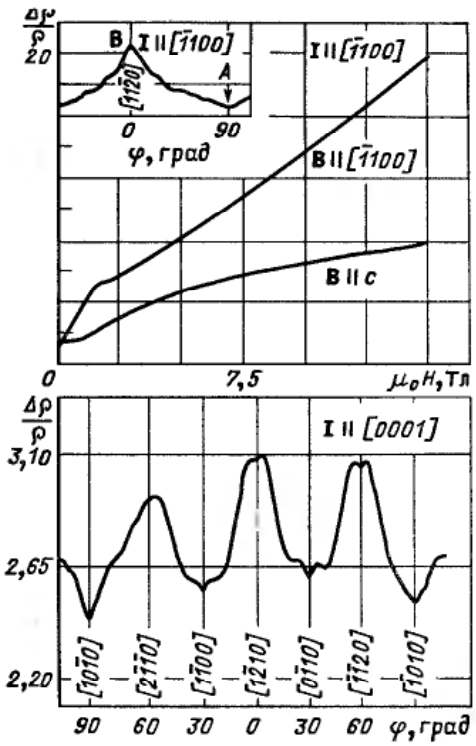


Рис. 30.49. Угловые диаграммы вращения и зависимость от $\mu_0 H$ $\Delta\rho/\rho_\perp$ для монокристаллов Co [45] ($T=4{,}2$ К; $\mu_0 H=15$ Тл; RRR=204; φ — угол вращения магнитного поля в плоскости, перпендикулярной электрическому току через образец)

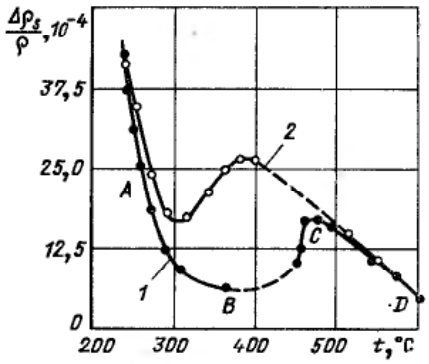


Рис. 30.50. Температурная зависимость насыщения $\Delta\rho_s/\rho$ для Co при нагреве (*1*) и охлаждении (*2*) [46]

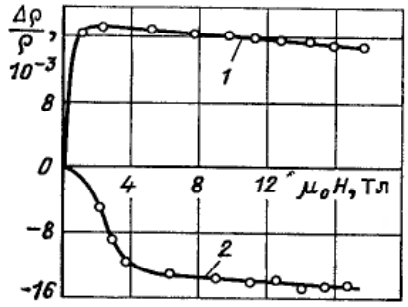


Рис. 30.51. Зависимость $\Delta\rho/\rho_\parallel$ (*1*) и $\Delta\rho/\rho_\perp$ (*2*) для Ni от $\mu_0 H$ при $t=20$ °C [47]

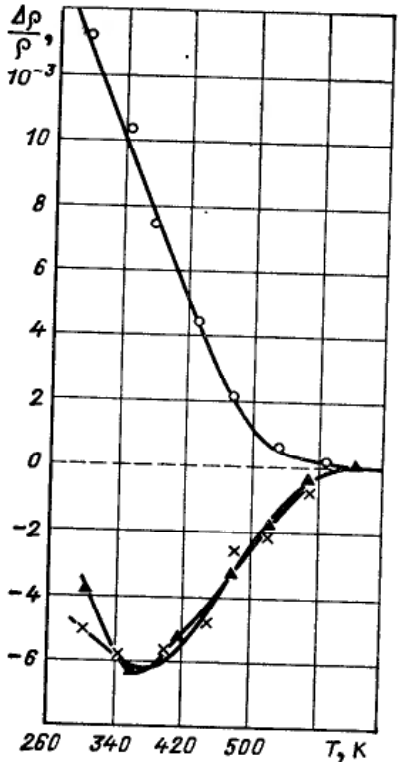


Рис. 30.52. Температурная зависимость насыщения $\Delta\rho_S/\rho_\parallel$ и $-\rho_S/\rho_\perp$ для Ni [48]:
○ — $\Delta\rho_S/\rho_\parallel$; × — $\Delta\rho_S/\rho_\perp$ (θ=0; ▲ — $\Delta\rho_S/\rho_\perp$ (θ=60°)
(θ — угол между плоскостью образца и направленнем магнитного поля)

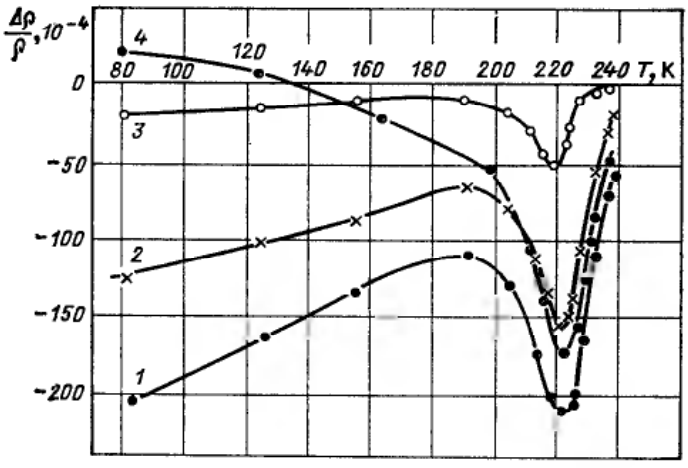


Рис. 30.53. Температуриая зависимость $\Delta\rho/\rho$ для Tb [49]:
1 — $\Delta\rho/\rho_\parallel$, μ_0H=1,5 Тл; *2* — $\Delta\rho/\rho_\parallel$, μ_0H=0,78 Тл; *3* — $\Delta\rho/\rho_\parallel$, μ_0H=0,13 Тл; *4* — $\Delta\rho/\rho_\perp$, μ_0H=1,5 Тл

30.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ ХОЛЛА МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.5 и 30.6 и на рис. 30.54—30.69 приведены сведения о коэффициенте Холла для различных материалов.

Таблица 30.5. **Значения коэффициента Холла для жидких металлов**

Металл	R, 10^{-11} м³/(А·с)	T, К	Литература
Алюмиииий	—3,9	933—1123	[101]
Висмут	—3,0	558—603	[102]
Галлий	—3,9	303—873	[102]
Германий	—3,6	1233—1283	[102]
Золото	—11,8	1336—1423	[101]
Индий	—5,6	429—973	[101]
Кадмий	—7,2	594—673	[103]
Лантан	<0	—	[104]
Медь	—8,25	1356—1423	[101]
Натрий	—25	371	[102]
Неодим	<0	—	[104]
Олово	—4,4	523—593	[103]
Празеодим	<0	—	[104]
Ртуть	—7,6	303—483	[103]
Рубидий	—42	308	[99]
Свинец	—4,48	623	[105]
Серебро	—11,6	1273	[105]
Таллий	—12,6	500—1000	[102]
Церий	+8,0	873—1223	[106]
Цезий	—74,6÷78,6	307—372	[107]
Уран	+3,8	273—1473	[104]

Таблица 30.6. **Значения коэффициента Холла для металлов**

Металл, чистота	T, К	B, Тл	R, 10^{-11} м³/(А · с)	Литература
Алюминий 99,5%, RRR=11	83	0,54	—2,2	[50]
То же	273	0,54	—3,3	[50]
»	573	0,54	—3,9	[50]
»	873	0,54	—4,1	[50]
Алюминий 99,9999%, RRR = 84 ÷ 2600	2—80	0,5	См. рис. 30.54	[51]
Бериллий монокристаллический 99,5%	290	0,3—2,0	$R_{\mathbf{B}\parallel c_3} = -77$	[52]
Бериллий монокристаллический 99,99%	290	0,3—2,0	$R_{\mathbf{B}\parallel c_3} = -76{,}4$	[53]
То же	290	0,3—2,0	$R_{\mathbf{B}\perp c_3} = 148$	[53]
Ванадий 99,6%, RRR = 11,5	20	—	См. рис. 30.55	[53]
То же	300	—	6,2	[54]
Висмут монокристаллический	—	—	7,9	[54]
Вольфрам 99,9%	870	0,54	См. рис. 30.56	[55]
То же	273	0,54	15,6	[50]
»	170	0,54	11,1	[50]
»	80	0,54	10,6	[50]
Гафний 99,9%, RRR = 27,5	300	1,3	12,0	[50]
То же	200	1,3	4,2	[56]
»	100	1,3	3,0	[56]
»	4,2	1,3	1,9	[56]
Золото 99,9999%, RRR = 1957	300	1,52	—2,6	[56]
То же	4,2—300	—	—7,3	[57]
Индий 99,9999%, RRR = 7100	300	—	См. рис. 30.57	[57]
То же	6—280	6,3($\omega\tau > 1$)	—5,43	[58]
			16	[59]
Иридий, ρ (20 К)/ρ (300 К) = 0,21	300	—	См. рис. 30.58	[59]
То же	81	—	3,18	[60]
Иттербий	300	0,55	3,49	[60]
То же	77	0,55	35	[61]
Иттербий RRR = 17	20—400	0,20	38	[61]
Иттрий, RRR = 10, монокристаллический	300	1,0	См. рис. 30.59	[62]
То же	300	1,0	$R_{\mathbf{B}\perp c_3} = 4{,}7$	[63]
			$R_{\mathbf{B}\parallel c_3} = -17{,}2$	[63]
То же, RRR = 15	4—300	—	См. рис. 30.60	[63]
Кадмий поликристаллический	90	1,0	См. рис. 30.60	[64]
То же	20	1,0	10	[65]
»	4,2	1,0	20	[65]
Кадмий монокристаллический	297	—	—14	[65]
То же	297	—	$R_{\mathbf{B}\perp c_3} = 3{,}9$	[66]
Калий	300	—	$R_{\mathbf{B}\parallel c_3} = 13{,}9$	[66]
То же, RRR = 1000 ÷ 8000	4—100	0,05—0,95	—42	[67]
Кальций 99%	300	0,1	См. рис. 30.61	[68]
Лантан 99,8%	20—300	0,56	—17,8	[69]
Литий, RRR = 850	300	0,95	—8	[70]
То же	4,2	0,95	—13,8	[71]
»	—	—	—14,8	[71]
Лютеций, RRR = 25	300	0,55	См. рис. 30.62	[71]
			—5,3	[61]
Магний 99,999%	300	0,4—2,5	См. рис. 30.60	
То же	300	—	—8,3	[72]
»	300	—	$R_{\mathbf{B}\parallel c_3} = -7{,}8$	[72]
Марганец	297	0,6—2,9	$R_{\mathbf{B}\perp c_3} = -0{,}8$	[72]
α-Марганец	4—300	—	8,44	[73]
Медь 99,9999%	300	1,5	См. рис. 30.63	[73]
То же	150	1,5	—5,3	[57]
»	50	1,5	—5,4	[57]
»	40	1,5	—6,3	[57]
»	4	1,5	—6,8	[57]
То же, RRR = 150	<80	0,0085—0,51	—6,5	[57]
Молибден	873	0,54	См. рис. 30.64	[75]
»	273	0,54	17,6	[50]
»	83	0,54	18,0	[50]
То же, RRR = 32 000	4—150	1,25	17,9	[50]
			См. рис. 30.65	[76]

Металл, чистота	T, K	B, Тл	R, 10^{-11} м³/(А · с)	Литература
Натрий	300	1,0	—13,2	[77]
»	78	1,0	—12,4	[77]
»	20	1,0	—12,7	[77]
То же, RRR = 1500 ÷ 6700	4—100	0,525—0,945	См. рис. 30.66	[68]
Неодим 99,98%	293	0,56	9,71	[70]
То же	—	—	См. рис. 30.67	[70]
Ниобий. RRR = 13	300	3,0	8,72	[78]
То же	77	3,0	8,50	[78]
»	4,2	3,0	9,54	[78]
Олово 99,9%	294	0,81	—0,22	[79]
То же, RRR = 60000	4,2	0,69	$R_{B \parallel [00\bar{1}]} = -48$	[80]
Осмий, RRR = 12	300	—	2,9	[81]
Палладий	300	—	—7,5	[82]
»	115	—	—6,2	[82]
»	4,2	—	—7,8	[83]
Платина 99,9%	300	0,54	—2,2	[50]
То же	170	0,54	—1,8	[50]
»	80	0,54	—2,0	[50]
α-Плутоний	6—438	—	См. рис. 30.63	[84]
β-Плутоний	100—438	—	+3	[84]
	7	—	—90	[84]
γ-Плутоний	400	—	3	[84]
	7	—	37	[84]
Празеодим 99,9%	20—300	1,0	См. рис. 30.67	[70]
То же	300	—	7,1	[70]
Рений, RRR = 38	300	1,5	22	[85]
То же	200	1,5	28	[85]
»	100	1,5	32	[85]
Родий 99,9%	300	0,49	5,02	[86]
Рубидий дистиллят	300	—	—50	[87]
То же, RRR = 489—441	—	0,95	См. рис. 30.68	[71]
Рутений	300	0,49	+22	[88]
Самарий 99,9%	300	0,55	—2	[61]
То же, RRR = 17,3	17	0,55	28	[89]
»	2,4	0,55	16	[89]
Свинец 99,9%, RRR = $6 \cdot 10^3$	293	—	0,98	[90]
То же монокристаллический	4,2	2,3	$R_{B \parallel [110]} = 43$	[91]
Серебро 99,9999%, RRR = 918	300	1,52	—8,98 (См. рис. 30.57)	[57]
Скандий 99,86%	300	1,3	—6,7	[92]
То же	4,2	1,3	—3,0	[92]
Таллий	297	1,7—1,8	2,4	[93]
Тантал	300	0,54	10	[94]
Титан 99,97% монокристаллический	300	0,95	$R_{B \parallel c_3} = 7,1$	[95]
То же	300	0,95	$R_{B \perp c_3} = -10,8$	[95]
α-Торий, RRR = 18,2	297	3,0	—11,16	[71]
То же	77	3,0	—10,35	[71]
»	4,2	3,0	—9,7	[71]
Тулий поликристаллический 99,9%	300	0,55	—15	[61]
То же, RRR = 7,4	—	—	$R_0 = -23,5$	[96]
Хром 99,9%	287	1,0—2,9	+36,3	[97]
То же, RRR = 15	8—40	1,0	См. рис. 30.69	[98]
Цезий 99,9%	293	—	—73,2	[99]
То же	200	—	—71,5	[99]
Церий 99,8%	293	0,56	+18,1	[70]
Цинк 99,999% монокристаллический	297	1,86	$R_{B \parallel c_3} = 14,4$	[100]
То же	297	1,86	$R_{B \perp c_3} = -4,0$	[100]
»	77	1,86	$R_{B \parallel c_3} = 18,5$	[100]
»	77	1,86	$R_{B \perp c_3} = 2$	[100]
Цирконий, RRR = 27	300	0—1,5	15,5	[85]
То же	200	0—1,5	8,0	[85]
»	100	0—1,5	4,5	[85]
Уран, RRR = 12	273	3,0	3,93	[78]
То же	77	3,0	4,75	[78]
»	4,2	3,0	—0,31	[78]

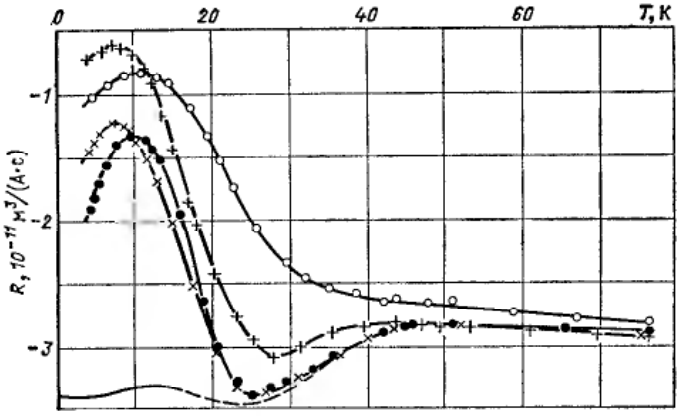


Рис. 30.54. Температурная зависимость коэффициента Холла в слабом магнитном поле ($\omega\tau<1$) для чистого Al [51]:

● — RRR=2380 и 6 N; × — RRR=2600 и 6N; + — RRR=1810 и 5 N;○ — RRR=84 и 4 N (6 N — чистота образца, соответствующая 99,9999%; нижняя кривая — теоретическая)

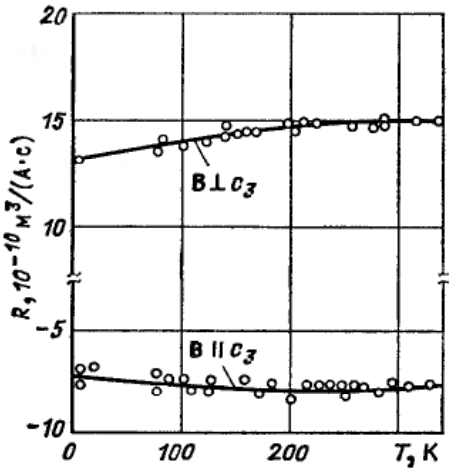
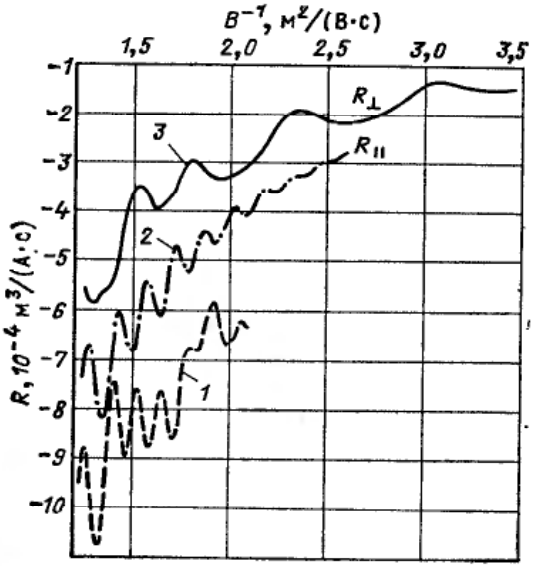


Рис. 30.55. Температурная зависимость коэффициента Холла для гексагонального монокристалла Be [53]



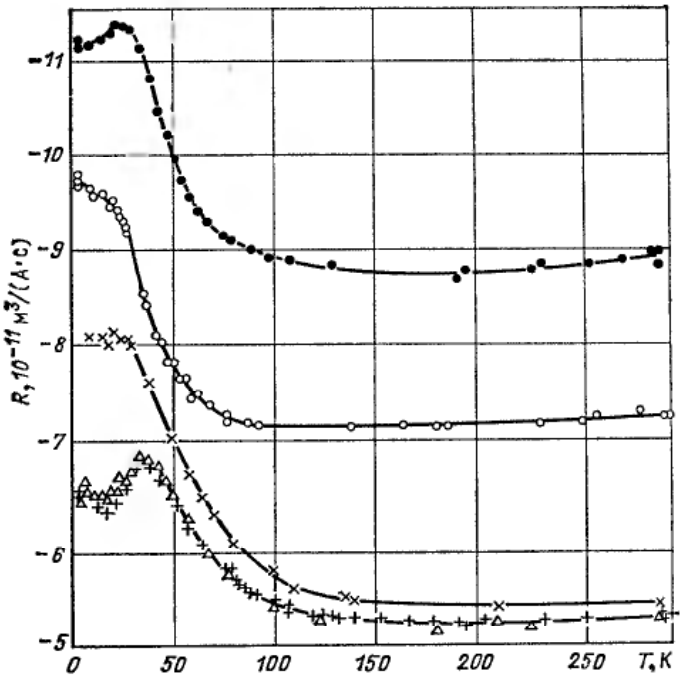


Рис. 30.57. Температурная зависимость коэффициента Холла для чистых образцов (99,9999%) Ag, Au и Cu [57]: ● — Ag, отожженный образец; ○ — Au, неотожженный образец; × — Cu, неотожженный образец; + — Cu, отожженный образец толщиной 0,929 мм, Δ — Cu, отожженный образец толщиной 1,719 мм

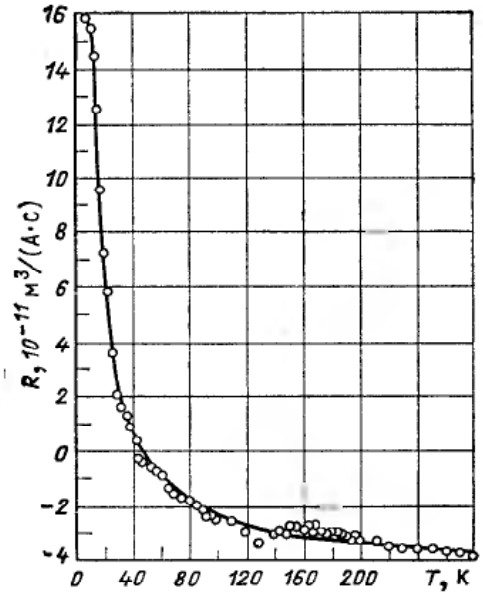


Рис. 30.58. Температурная зависимость коэффициента Холла монокристалла In [59] (магнитное поле $B=6{,}3$ Тл ориентировано вдоль оси [101] кристалла)

Рис. 30.56. Полевая зависимость коэффициента Холла монокристалла Bi при $T=1{,}4$ К [55]:

1 — угол между направлением магнитного поля и тригональной осью 25°, ток параллелен бинарной оси; *2* — магнитное поле параллельно тригональной оси; *3* — магнитное поле перпендикулярно тригональной оси; $R_\perp$ — $B_\parallel$ тригональной оси; $R_\parallel$ — $B_\parallel$ тригональной оси

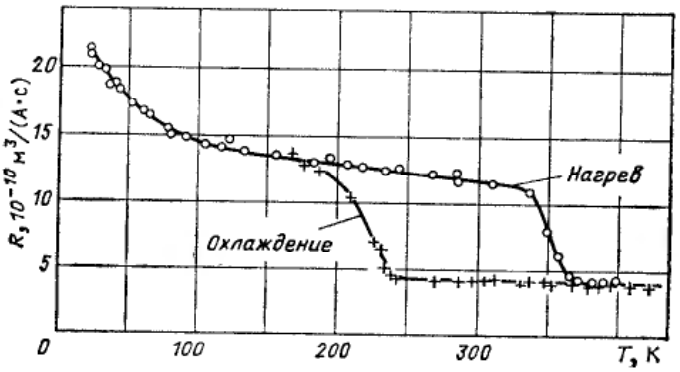


Рис. 30.59. Температурная зависимость коэффициента Холла монокристалла Yb (RRR=17; B=2,0 Тл) [62]

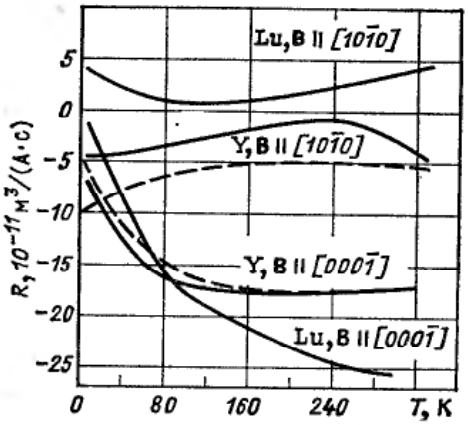


Рис. 30.60. Температурная зависимость коэффициента Холла для Y и Lu (сплошные линии [63], штриховые — [64])

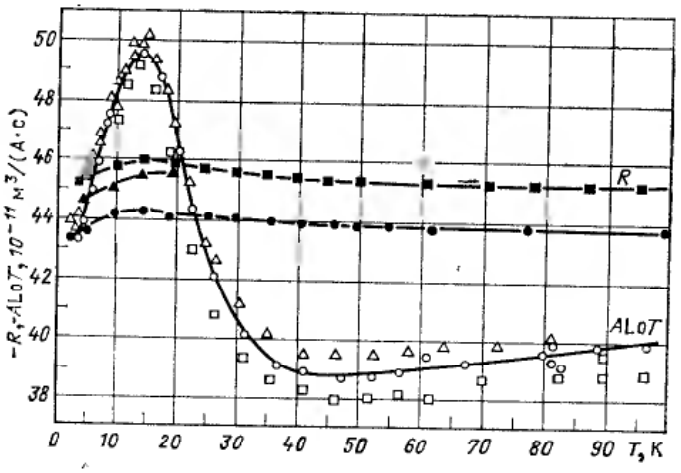


Рис. 30.61. Температурная зависимость коэффициентов Холла R и Риги—Ледюка ALoT (Lo* — число Лоренца; $\mathrm{Lo}=\frac{\pi^2}{3}\left(\frac{K}{e}\right)^2=2{,}45\cdot10^{-8}\ \frac{\text{Вт}\cdot\text{Ом}}{K^2}$; T — температура) для чистых образцов K [68]:
○ — RRR=720; △ — RRR=700; □ — RRR=2000; ● — RRR=2900; ■ — RRR=7900; ▲ — RRR=640; B=1 Тл

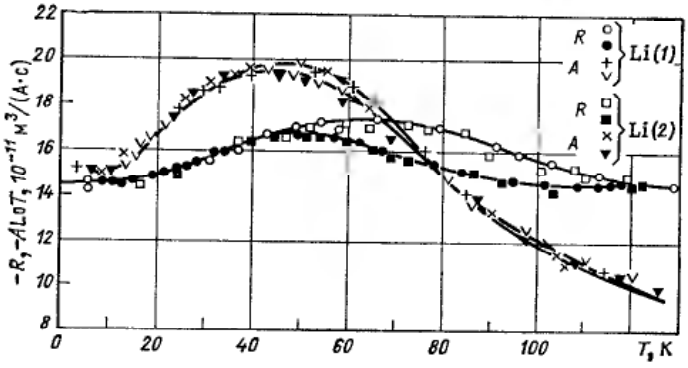


Рис. 30.62. Температурная зависимость коэффициентов Холла R и Риги—Ледюка ALoT (Lo* — число Лоренца, T — температура) для Li [71]

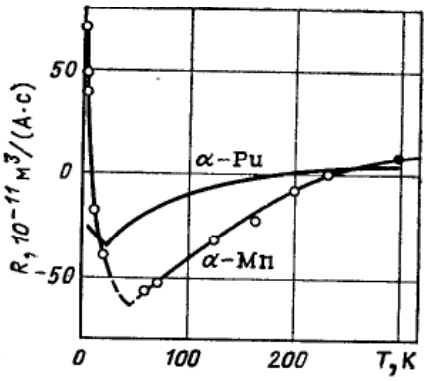


Рис. 30.63. Температурная зависимость коэффициента Холла для поликристаллических образцов α — Mn [74] и α — Pu [84]

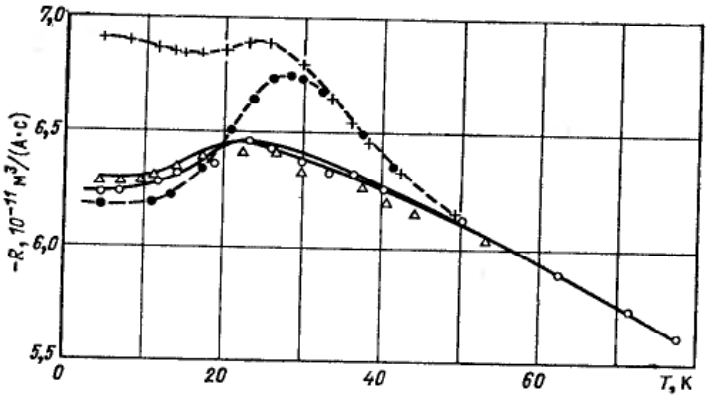


Рис. 30.64. Температурная зависимость коэффициента Холла для Cu [75]:
● △ — образец 1; +, ○ — образец 2; — — — B=0,5145 Тл; ——— B=0,0085 Тл

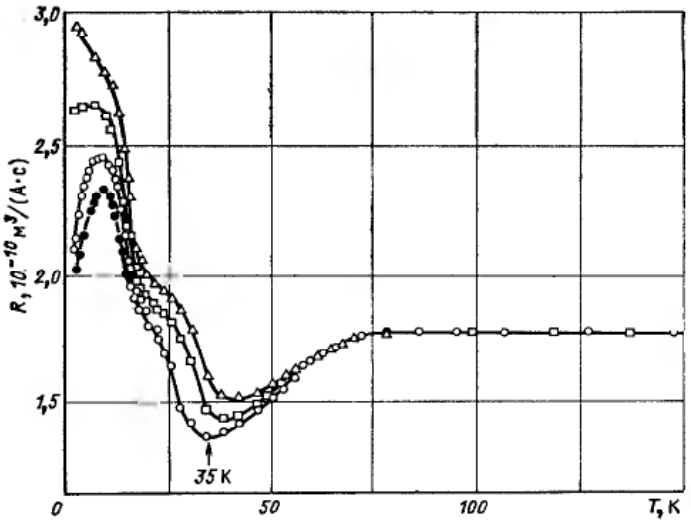


Рис. 30.65. Температурная зависимость коэффициента Холла для монокристалла Mo [76]:
$H \| <100>$; ● — B=0,25 Тл; ○ — B=0,45 Тл; □ — B=0,85 Тл; △ — B=1,25 Тл

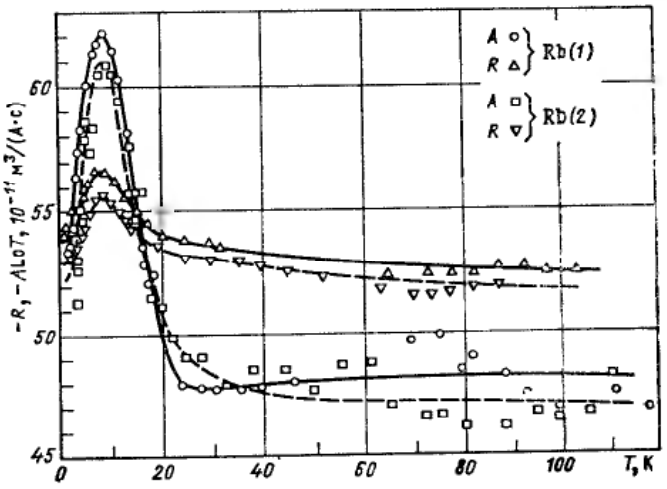


Рис. 30.68. Температурная зависимость коэффициентов Холла R и Риги — Ледюка AL_0T для Rb [71]

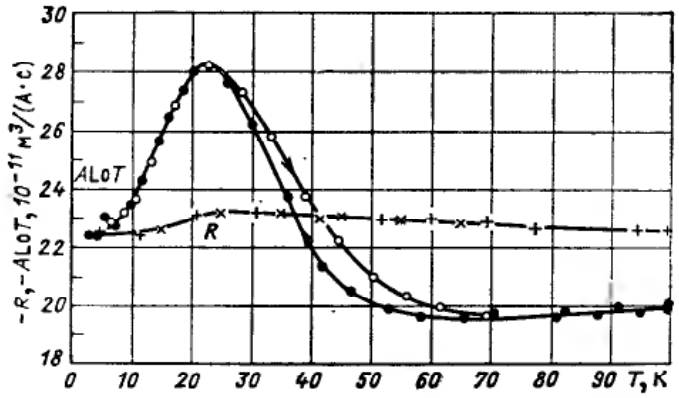


Рис. 30.66. Температурная зависимость коэффициентов Холла R и Риги—Ледюка AL_0T (Lo* — число Лоренца, T — температура для Na [68]):
RRR=1500; ●, + — охлаждение; ○, × — нагрев

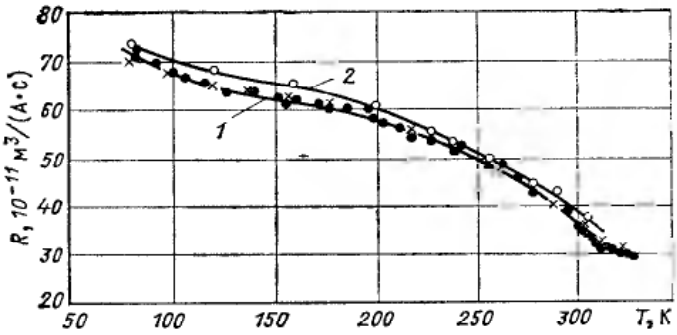


Рис. 30.69. Температурная зависимость коэффициента Холла для Cr [98]:
1 — до отжига; *2* — после отжига

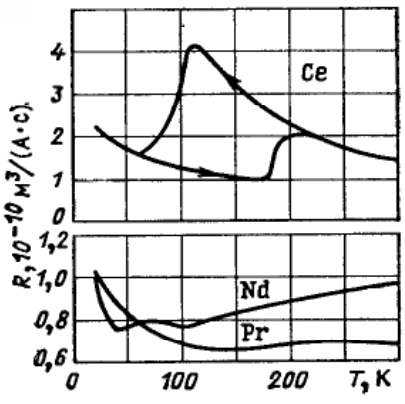


Рис. 30.67. Температурная зависимость коэффициентов Холла для поликристаллических образцов Ce, Nd, Pr [70]

30.5. КОЭФФИЦИЕНТЫ ХОЛЛА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.7 и 30.8 и на рис. 30.70—30.76 приведены данные о коэффициенте Холла ферромагнетиков и редкоземельных металлов.

Таблица 30.7. **Значения коэффициентов Холла для ферромагнитных металлов**

Металл, чистота	T, К	$\mu_0 H$, Тл	R_0, 10^{-10} м³/(А · с)	R_S, 10^{-10} м³/(А·с)	Литература
Железо 99,99%, RRR = 20	293	0—3,3	0,2	6,8	[108]
То же поликристаллическое	4,2—300	—	См. рис. 30.70		[109]
Железо, вискеры, RRR = 180÷452	1—300	—	См. рис. 30.70		[110]
То же 99,99%	1—800	—	См. рис. 30.71		[111]
Кобальт 99,99%, RRR = 60	293	0—2,8	—0,84	0,14	[109]
То же 99,99%	273—1400	0,23	См. рис. 30.72		[112]
Никель 99,999%, RRR = 480	293	0—2,9	—0,56	—5,0	[113]
То же 99,999%	$T > T_C$	0,85	—1,08	—41	[114]
То же	70—700	—	См. рис. 30.73		[115]

Таблица 30.8. **Значения коэффициентов Холла для магнитных редкоземельных металлов**

Металл, чистота	T, К	R_0, 10^{-10} м³/(А · с)	R_S, 10^{-10} м³/(А·с)	Литература
Гадолиний 99,9%, RRR = 51, поликристаллический	$T > T_C$	—2	—384	[116]
Гадолиний, RRR = 20, монокристаллический	$T > T_C$	—	—225*1; —452*2	
То же, RRR = 40	$T < T_C$	См. рис. 30.74		[64]
Гольмий 99,9%, RRR = 12, поликристаллический	$T > T_C$	—2,2	—2,8	[117]
То же монокристаллический	$T > T_C$	—3,2*1; +0,2*2	—13,2*1; +2,2*2	[118]
Диспрозий 99,9%, RRR = 10, монокристаллический	$T > T_C$	—5,7*1; —1,0*2	—25,5*1; —32,6*2	[119]
Диспрозий, монокристаллический, RRR = 16	$T < T_C$	См. рис. 30.75		[120]
Тербий 99,9%, RRR = 46, поликристаллический	$T > T_C$	—4,4	—42	[121]
То же, RRR = 20, монокристаллический	$T > T_C$	—4,0*1; —1,1*2	—52*1; —40*2	[122]
Тербий монокристаллический		См. рис. 30.76		[123]
Эрбий поликристаллический	$T > T_C$	—0,34	—	[70]
Эрбий монокристаллический	$T > T_C$	—3,6*1; 0,3*2	—9,4*1; 4,4*2	[124]

*1 $B \parallel c_3$.
*2 B в базисной плоскости.

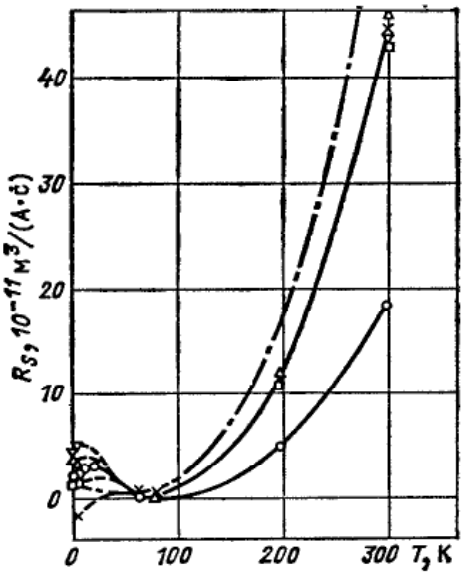


Рис. 30.70. Температурная зависимость аномального коэффициента Холла R_S для усов Fe [110] (штрихпунктирная линия — для поликристаллического Fe [109]):

Образец	Направление I и оси усов Fe	Направление B	Направление ЭДС Холла	RRR
×	[111]	[110]	[112]	196
△	[111]	[110]	[112]	213
○	[100]	[010]	[001]	213
□	[100]	[010]	[001]	452
▽	[100]	[010]	[001]	180

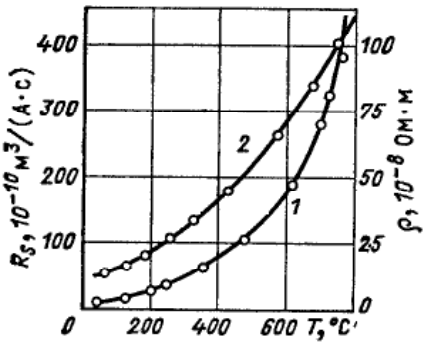


Рис. 30.71. Температурные зависимости аномального коэффициеита Холла R_S (*1*) и удельного электросопротивления ρ (*2*) для Fe [111]

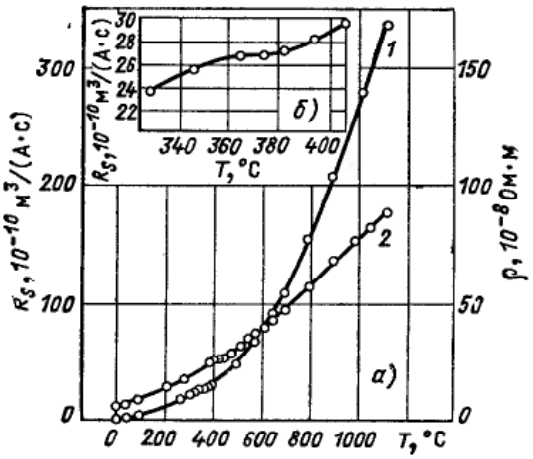


Рис. 30.72. Температурные зависимости аномального коэффициента Холла R_S (*1*) и удельного электросопротивления ρ (*2*) для Co [112] (*а*) и температурное изменение в окрестности фазового превращения (*б*)

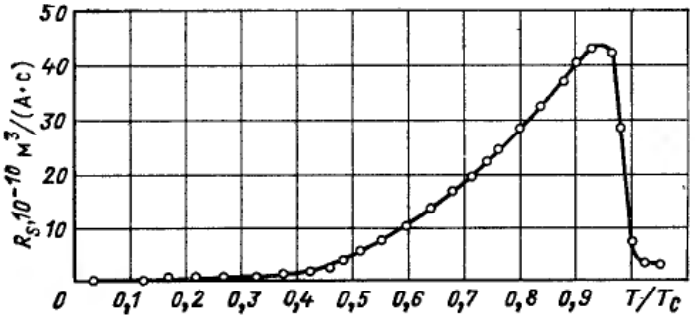


Рис. 30.73. Температурная зависимость аномального коэффициента Холла R_S для Ni [115] (T_C — температура Кюри)

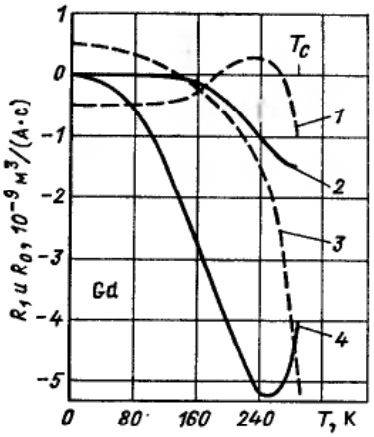


Рис. 30.74. Температурная зависимость аномального R_1 и обыкновенного R_0 коэффициентов Холла для монокристалла Gd [64]:

1 — R_0, В в базисной плоскости; *2* — R_1, В в базисной плоскости; *3* — R_0, В ||*c*; *4* — R_1, В ||*c*

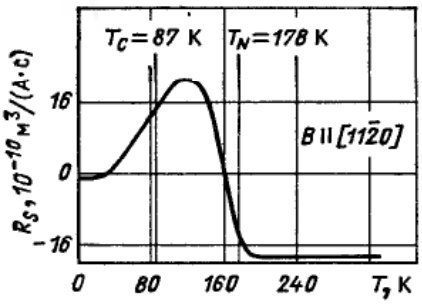


Рис. 30.75. Температурная зависимость аномального коэффициента Холла R_S для монокристалла Dy [120]

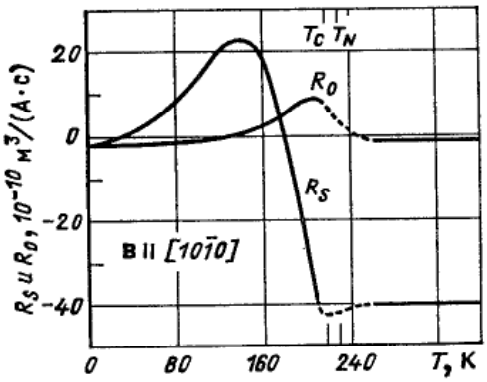


Рис. 30.76. Температурные зависимости обыкновенного R_0 и аномального R_S коэффициентов Холла для монокристалла Tb [123]

30.6. ТЕРМОМАГНИТНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ МЕТАЛЛОВ

В табл. 30.9 и 30.10 и на рис. 30.77 — 30.82 приведены данные о термомагнитных характеристиках металлов.

Таблица 30.9. **Значения термомагнитных коэффициентов для металлов**

Металл, чистота	T, К	A, 10^{-8} м²/(В·с)	Q, 10^{-8} м²/(К·с)	Литература
Алюминий 99,5%	313	—0,63	+0,39	[125]
Вольфрам	332	+1,5	—10	[125]
Золото*1		См. рис. 30.77		[126]
Иридий		См. рис. 30.78		[127]
Иридий, RRR = 23	323	+0,55	—0,05	[125]
То же	300	—	—0,44	[81]
Иттрий*2	293	—	—	[128]
Кадмий	320	+0,89	—1,20	[125]
Калий*1		См. рис. 30.61		[68]
Литий*1		См. рис. 30.62		[71]
Марганец	330	—	+0,15	[125]
Медь*3		См. рис. 30.77		[126]
Молибден	333	—	—1,72	[125]
Натрий*1		См. рис. 30.66		[68]
Ниобий		См. рис. 30.79		[129]
Олово	330	—	—0,04	[125]
Осмий, RRR = 12	300	—	—2,32	[81]
Палладий*4	300	—0,487	+3,27	[125]
Платина, RRR = 5,4	323	—0,21		[125]
То же	300	—	—1,68	[81]
Рений, RRR = 447	300	—	—6,4	[81]
Родий		См. рис. 30.80		[130]
Рубидий*1		См. рис. 30.68		[71]
Рутений		См. рис. 30.80		[130]
Свинец	300	—	—0,05	[125]
Серебро*1		См. рис. 30.77		[126]
Таллий	333	—	—0,37	[125]
Тантал		См. рис. 30.80		[130]
Цинк	323	+1,29	—2,40	[125]

*1 Для металлов со знаком *1 представлены рисунки температурных зависимостей коэффициентов Риги — Ледюка A, значения которых умножены на $L_0T\left(L_0=\frac{\pi^2}{3}\left(\frac{k}{e}\right)^2=2.45\cdot10^{-8}\ \text{Вт}\cdot\text{Ом/К}^2\right)$ для более удобного сравнения их с коэффициентами Холла.
*2 $P = 75\cdot10^{-4}$ К·м³/(В·А·с);
*3 $P = -1{,}446\cdot10^{-8}$ К·м³/(В·А·с);
*4 $P = 16.2\cdot10^{-8}$ К·м³/(В·А·с).

Таблица 30.10. **Значения термомагнитных коэффициентов для ферромагнитных металлов**

Металл	T, К	B, К	P_1, 10^{-8} К·м³/(В·А·с)
Железо	313	2,3	—20,3
Кобальт	298	0,95	87
»	300—900	—	—
Никель	313	0,667	55
»	2—450	—	—

Продолжение табл. 30.10

Металл	A_1, 10^{-8} м²/(В·с)	Q_1, 10^{-8} м²/(К·с)	Литература
Железо	3,28	—20,4	[131]
Кобальт	3,77	19	[125]
»	—	См. рис. 30.81	[132]
Никель	—49	48,2	[133]
»	—	См. рис. 30.82	[125]

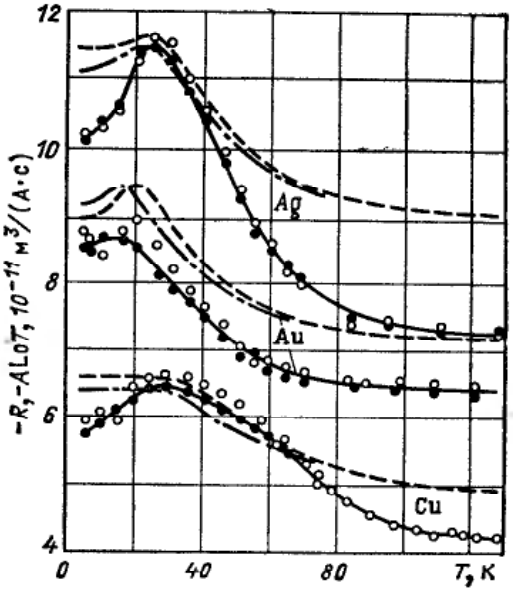


Рис. 30.77. Температурные зависимости коэффициентов Холла R и Риги — Ледюка ALoT для Ag, Au и Cu [126]: — — — — R, B=0,935 Тл; —.—.—.— R, B=0.518 Тл; ○ — ALoT, B=0,935 Тл; ● — ALoT, B=0,518 Тл

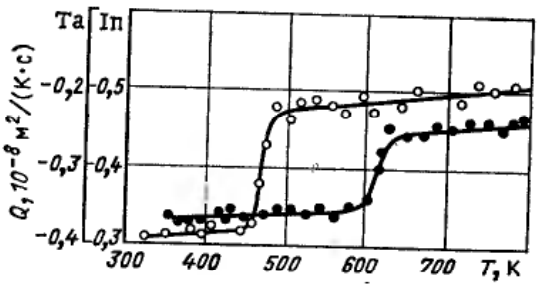


Рис. 30.78. Температурная зависимость коэффициента Нернста для Tl (●) и In (○) в твердом и жидком состояниях [127]

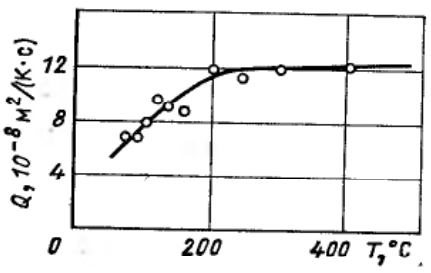


Рис. 30.79. Температурная зависимость коэффициента Нернста для Nb [129]

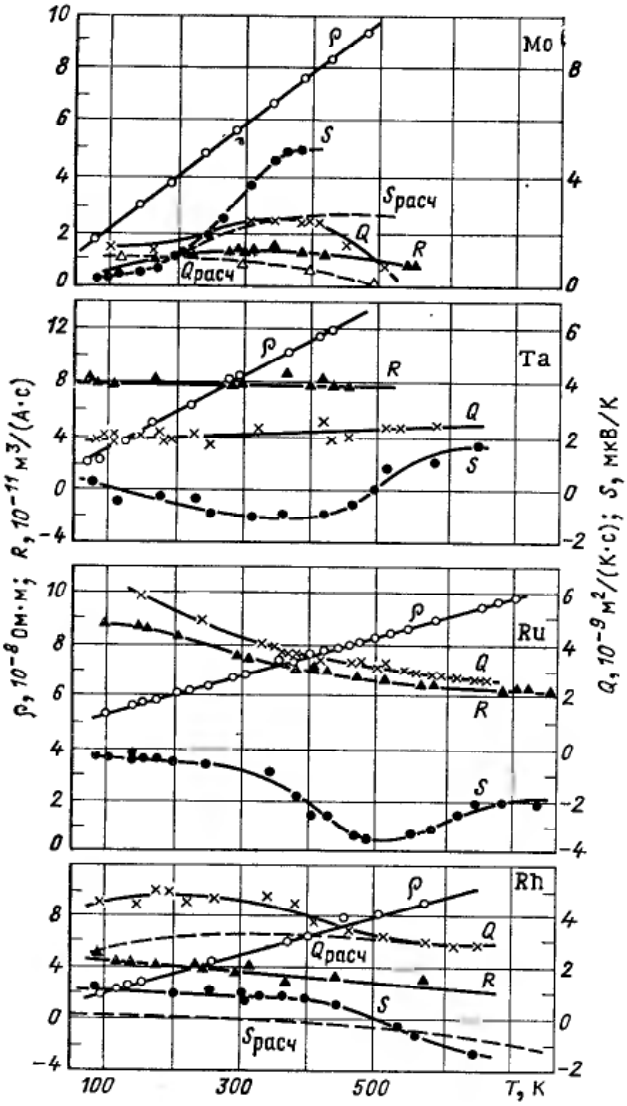


Рис. 30.80. Температурные зависимости удельного электросопротивления ρ, термо-ЭДС S, константы Холла R и константы Нернста Q для некоторых материалов [130]

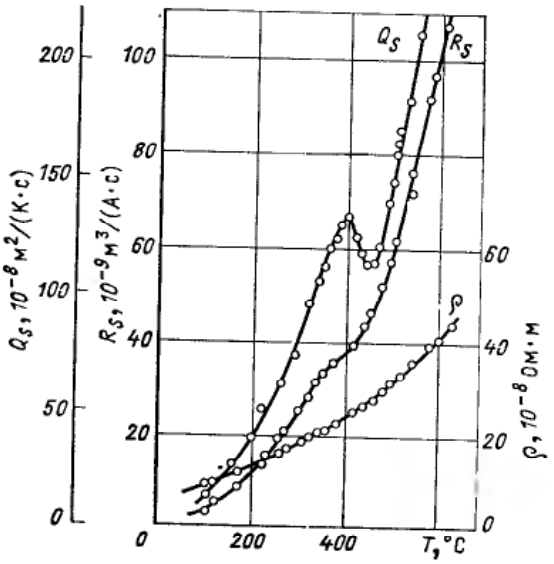


Рис. 30.81. Температурные зависимости коэффициентов Холла R_S, Нернста Q_S и удельного электросопротивления ρ для Co [132]

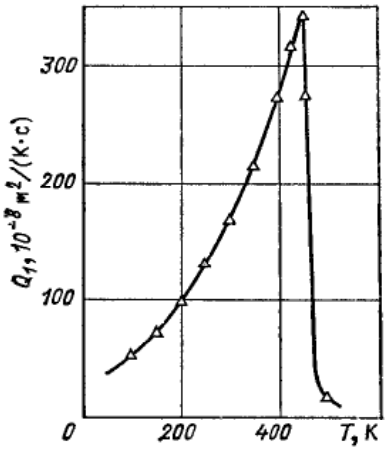


Рис. 30.82. Температурная зависимость коэффициента Нернста Q_1 для Ni [125]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гайдуков Ю. П.**//Успехи физ. наук. 1970. Т. 100. Вып. 3. С. 449—466.

2. **Крэкнелл А., Уонг К.** Поверхность Ферми: Пер. с англ./Под ред. В. Я. Кравченко. М.: Атомиздат. 1978.

3. **Harrison W. A., Webb M. B.** The Fermi Surface. N. Y. — Lond.: John Woley. 1960.

4. **Лифшиц И. М., Азбель М. Я., Кагаиов М. И.** Электронная теория металлов. М.: Наука. 1971.

5. **Meaden G. T.** Electrical resistance of metals. N. Y.: Plenum Press. 1965.

6. **Fawcett E.**//Advances Phys. 1964. Vol. 13, N 50. P. 139—153.

7. **Hurd C. M.** The Hall Effect in Metals and Alloys. N. Y.: Plenum Press, 1972.

8. **Fickeff F. R.**//Phys. Rev. 1971. Vol. B3. P. 1941.

9. **Rocofyllou E., Papathanassopoulov C.**//Physica. 1980. Vol. BC 100, N 1. P. 99—100.

10. **Justi E., Kramer J.**//Physical Z. 1940. Bd 41. S. 197—205.

11. **Kapitza P.** Proc. Roy. Soc. (Lond.), 1929. Vol. A123. P. 292, 342.

12. **Алексеевский Н. Е., Егоров В. С.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1963. Т. 45, № 2. С. 388—391.

13. **Landolt-Bornstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Austronomie, 6 Teil, Elektrische Eigenschaften 1. Berlin, Gottingen — Heidelberg: Springer — Verlag, 1959.

14. **Волкенштейн Н. В., Новоселов В. А., Старцев В. Е.**//Физика металлов и металловедение. 1966. Т. 22, № 2. С. 175—180.

15. **Reed W. A., Marcus J. A.**//Phys. Rev. 1962. Vol. 126. N 4. P. 1298—1300.

16. **McClure P. W., Spry W. J.**//Phys. Rev. 1968. Vol. 165. N 3. P. 809—815.

17. **Jánoš S., Fener A., Flachbart K.**//Phys. Stat. Sol. (b). 1977. Vol. 81. N 1. P. K19—K23.

18. **Justi E.** Physical Z. 1940. Bd 41. S. 486—490.

19. **Гайдуков Ю. П.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1959. Т. 37, № 5. С. 1281—1291.

20. **Волоцкая В. Г.**//Там же. 1963. Т. 45, № 1. С. 49—51.
21. **Лазарев Б. Г., Нахимович Н. М., Парфеенова Е. А.**//Там же. 1938. Т. 9, № 10. С. 1169—1178.
22. **Penz P. A., Bowers R.**//Phys. Rev. 1968. Vol. 172. № 3. P. 991—1000.
23. **Gugan D., Jones B. K.**//Helv. Phys. Acta. 1963. Vol. 36, № 1. P. 6—11.
24. **Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1960. Т. 38, № 6. С. 1720—1722.
25. **Алексеевский Н. Е., Егоров В. С., Карстенс Г. Э., Козак Б. Н.**//Там же. 1962. Т. 43, № 1. С. 731—733.
26. **Babiskin J., Siebenmann P. G.**//Phys. Kondens Materia. 1969. Vol. 9(1/2). P. 113—121.
27. **Nagasawa H.**//Phys. Lett. 1972. Vol. 414, № 1. P. 39—40.
28. **Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1959. Т. 36, № 2. С. 446—449.
29. **Алексеевский Н. Е., Дубровин А. В., Карстенс Г. Э., Михайлов Н. Н.**//Там же. 1968. Т. 54, № 3. С. 350—353.
30. **Aschermann G., Justi E.**//Physikal Z. 1942. Bd. 43. S. 207—210.
31. **Алексеевский Н. Е., Егоров В. С., Козак Б. Н.**// Журн. эксперим. и теорет. физ. 1963. Т. 44, № 3. С. 1116—1118.
32. **Schulze R.**//Physik Z. 1941. Bd. 42. S. 297.
33. **MacDonald D. K. C.**//Philos. Mag. 1957. Vol. 2, № 13. P. 97—104.
34. **Болотин Г. А., Новоселов Н. А., Старцев В. Е.**// Физика металлов и металловедение. 1972. Т. 33, № 4. С. 740—743.
35. **Боровик Е. С.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1954. Т. 27, № 3. С. 355—368.
36. **Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.**//Там же. 1959. Т. 37, № 3. С. 672—677.
37. **Young R. C.**//Phys. Rev. 1967. Vol. 163. № 3. P. 676—685.
38. **Justi E.**//Ann. Physik. 1948. Bd(6)3. S. 183—190.
39. **Reed W. A., Brennert G. F.**//Phys. Rev. 1963. Vol. 130. № 2. P. 565—576.
40. **Бабушкина Н. А.**//Докл. АН СССР. Сер. физ. 1964. Т. 155, № 6. С. 1290—1292.
41. **McEven K. A., Werbber G. D., Roeland L. W.**// Physica. 1977. Vol. 86—88B. P. 531—532.
42. **Akhavan M., Blackstead H. A.**//Phys. Rev. B. 1976. Vol. 13, № 3. P. 1209—1215.
43. **Akhavan M., Blackstead H. A.**//Ibid. 1973. Vol. 8, № 9. P. 4258—4261.
44. **Isin A., Colemann R. V.**//Phys. Rev. 1966. Vol. 142, № 2. P. 372—378.
45. **Colemann R. V., Morris R. S., Sellmeyer D. J.**// Phys. Rev. B. 1973. Vol. 8, № 1. P. 317—331.
46. **Богма К. К., Зубов В. В.**//Физика металлов и металловедение. 1965. Т. 20, № 1. С. 135—137.
47. **Белов К. П.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1951. Т. 21, № 5. С. 809—812.
48. **Kaul S. N.**//J. Phys. F. 1977. Vol. 7, № 10. P. 2091—2098.
49. **Белов К. П., Никитин С. А.**//Физика металлов и металловедение, 1962. Т. 13, № 1. С. 43—48.
50. **Frank V.**//Appl. Sci. Res. 1958. Vol. B7. P. 41—45.
51. **Barnard R. D., Addel Rahiem AEE**//J. Phys. F. 1980. Vol. 10, № 12. P. 2739—2749.
52. **Боровик Е. С.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1952. Т. 23, № 1. С. 83—87.
53. **Shiozaki J.**//Phys. Lett. 1974. Vol. A50. P. 203—204.
54. **Амитин Е. Б., Ковалевская Ю. А., Ковдри Ю. З.**// Физика твердого тела. 1967. Т. 9. С. 905—908.
55. **Reynolds J. M., Hemstreet H. M.**//Phys. Rev. 1954. Vol. 96. P. 1203—1207.
56. **Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.**//Физика металлов и металловедение. 1964. Т. 18. С. 784—786.
57. **Alderson J. E., Farrel T., Hurd C. M.**//Phys. Rev. 1968. Vol. 174. P. 729—736.
58. **Cooper J. N., Cotti P., Rasmussen F. B.**//Phys. Lett. 1965. Vol. 19. P. 560—562.
59. **Ozimek E. J., Leisure R. G.**//Ibid. 1978. Vol. A66, № 5. P. 413—415.
60. **Gehlhoff P. O., Justi E., Kohler M.**//Z. Naturforsch. 1950. Vol. 5a. S. 16—18, 1949. Vol. 4a. S. 561—563.
61. **Anderson G. S., Legvold S., Spedding F. H.**//Phys. Rev. 1959. Vol. 111, № 5. P. 257—261.
62. **Anderson J. E., Hurd C. M.**//Solid State Comm. 1972. Vol. 11. P. 1245—1248.
63. **Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.**//Физика металлов и металловедение. 1967. Т. 24. С. 1105—1107.
64. **Lee R. S., Legvold S.**//Phys. Rev. 1967. Vol. 162. P. 431—435.
65. **Saeger K. E., Luck R.**//Phys. Kond. Mater. 1969. Vol. 9. P. 91—94.
66. **Stringer J., Hill J., Huglin A. S.**//Philos. Mag. 1970. Vol. 21. P. 53—61.
67. **Cirles W.**//Z. Physik. 1957. Bd. 147. S. 481—485.
68. **Fletcter R., Friedman A. J.**//Phys. Rev. 1973. Vol. B8. P. 5381—5390.
69. **Frank V., Jeppesen O. G.**//Ibid. 1953. Vol. 89. P. 1153—1154.
70. **Kevane C. J., Legvold S., Spedding F. H.**//Ibid. 1953. Vol. 91. P. 1372—1379.
71. **Eletcher R.**//Ibid. 1977. Vol. 15. P. 3602—3608.
72. **Alty J. L., Stringer J.**//Phys. Stat. Sol. 1969. Vol. 32. P. 243—246.
73. **Foner S.**//Phys. Rev. 1957. Vol. 107. P. 1513—1516.
74. **Meaden G. P. T., Pelloux-Gervais P.**//Cryogenics. 1967. Vol. 7. P. 161—166.
75. **Barnard R. D.**//J. Phys. F. 1980. Vol. 10. № 10. P. 2251—2255.
76. **Черепанов В. И., Старцев В. Е., Волкенштейн Н. В.**//Физика низких температур. 1979. Т. 5. С. 1162—1167.
77. **Justi E.**//Ann. Physik. 1948. Vol. 6. P. 183—186.
78. **Berlincourt T. G.**//Phys. Rev. 1959. Vol. 114. P. 969—977.
79. **Andrewartha G. G., Evans E. J.** Philos. Mag. 1941. Vol. 31. P. 265—282.
80. **Качинский В. Н.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1962. Т. 43. № 10. С. 1158—1163.
81. **Немченко В. М., Львов С. Н., Малько П. И., Делиев В. Н.**//Физика металлов и металловедение. 1972. Т. 33, № 3. С. 540—545.
82. **Plate H.**//Phys. Kond. Mater. 1966. Vol. 4. P. 355—359.
83. **Schwaller R.**//Compt. rend. 1967. Vol. 264. P. 1064—1067.
84. **Brodsky M. B.**//Phys. Rev. 1965. Vol. 137. P. A1423—1428.
85. **Волков Д. Н., Козлова Т. М., Прудников В. Н., Козис Е. О.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1968. Т. 55, № 6. С. 2103—2107.
86. **Köster W., Hagmann D., Saeger K. E.**//Z. Metalkunde. 1963. Bd. 54. S. 619—622.
87. **Факидов И. Г.**//Докл. АН СССР. 1948. Т. 63. № 2. С. 123—425.
88. **Justi E.**//Z. Naturforsch. a. 1949. Bd. 4. S. 472—474.
89. **Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.**//Физика твердого тела. 1965. Т. 7, № 11. С. 3213—3217.
90. **Takano K., Sato T.**//J. Phys. Soc. Japan. 1965. Vol. 20. P. 2013—2016.
91. **Алексеевский Н. Е., Гайдуков Ю. П.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1961. Т. 41, № 2. С. 354—357.

92. **Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.**//Физика металлов и металловедение. 1963. Т. 16, № 2. С. 298—301.
93. **Smith A. W.**//Phys. Rev. 1916. Vol. 8. P. 79—83.
94. **Krautz E., Schultz H.**//Z. Augewdte Phys. 1963. Vol. 15. P. 1—6.
95. **Scovil G. N.**//Appl. Phys. Lett. 1966. Vol. 9. P. 247—248.
96. **Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.** — Физика металлов и металловедение. 1965. Т. 20. С. 508—511.
97. **Foner S.**//Phys. Rev. 1957. Vol. 107. P. 1513—1516.
98. **Амитин Е. Б., Ковалевская Ю. А.**//Физика твердого тела. 1968. Т. 10, № 6. С. 1884—1886.
99. **Kendall P. W.**//J. Nucl. Mat. 1970. Vol. 35. P. 41—50.
100. **Lane Y. S., Huglin A. S., Stringer J.**//Phys. Rev. 1964. Vol. 135. P. A1060—A1068.
101. **Busch G., Guntherodt H. — J.**//Phys. Kond. Mater. 1967. Vol. 6. P. 325—327; Advances. Phys. 1967. Vol. 16. P. 651—660.
102. **Busch G., Y. Thieche**//Phys. Kond. Mater. 1963. Vol. 1. P. 78—81.
103. **Greenfield A.**//Phys. Rev. 1964. Vol. 135. P. A1589—A1595.
104. **Busch G., Guntherodt H. — J., Kunzi H. U.**// Phys. Lett. 1970. Vol. 32A. P. 376—377.
105. **Shackle P. W.**//Philos. Mag. 1970. Vol. 21. P. 987—1002.
106. **Busch G., Guntherodt H. — J., Kunzi H. U., Schlapbach L.**//Phys. Lett. 1970. Vol. 31A. P. 191—192.
107. **Факидов И. Г.**//Докл. АН СССР. 1948. Т. 63. С. 123—125.
108. **Soffer S., Dreesden J. A., Pugh E. M.**//Phys. Rev. 1965. Vol. 140. P. A668—A675.
109. **Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1960. Т. 38. С. 64—68.
110. **Dheer P. N.**//Phys. Rev. 1967. Vol. 156. P. 637—644.
111. **Tsonkalas J. A.**//Phys. Stat. Sol.(a). 1974. Vol. 22, № 1. P. K59—K63.
112. **Tsonkalas J. A.**//Ibid. 1974. Vol. 23, № 1. P. K41—K45.
113. **Hugnenin R., Rivier D.**//Helv. Phys. Acta. 1965. Vol. 38. P. 900—912.
114. **Dutta Roy S. K., Subrahmanyam A. V.**//Phys. Rev. 1969. Vol. 177. P. 1133—1138.
115. **Kaul S. N.**//Ibid. 1979. Vol. B20. № 12. P. 5122—5130.
116. **Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.**//Журнал эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 50. С. 1505—1509.
117. **Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.**// Физика твердого тела. 1966. Т. 8. С. 1895—1898.
118. **Cullen P. R., Rhyne J. J., Mancini F.**//J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 1178—1181.
119. **Волкенштейн Н. В., Григорова И. К., Федоров Г. В.**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1966. Т. 51. С. 780—785.
120. **Rhyne J. J.**//Phys. Rev. 1968. Vol. 172. № 2. P. 523—529.
121. **Бабушкина Н. А.**//Физика твердого тела. 1965. Т. 7. С. 3026—3032.
122. **Федоров Г. В., Волкенштейн Н. В.**//Там же. 1970. Т. 12. С. 1374—1379.
123. **Rhyne J. J.**//Appl. Phys. 1969. Vol. 40. P. 1001—1003.
124. **Rhyne J. J., O'Connor M. C.**//Bull. Amer. Phys. Soc. 1969. Vol. 14. P. 306—310.
125. **Landolt-Bornstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, 6 Teil, Elektrische Eigenschaften. Berlin, Gottingen — Heidelberg: Springer-Verlag, 1959.
126. **Fletcher R., Friedman A. J., Stot M. J.**//J. Phys. F: Metal Phys. 1972. Vol. 2, № 4. P. 729—762.
127. **Кувандиков О. К., Субхакулов И., Даминов А.**// Физика металлов и металловедение. 1977. Т. 44. Вып. 3. С. 670—671.
128. **Zeechina L.**//Phys. Stat. Sol. 1970. Vol. 42. P. K153—K155.
129. **Кувандиков О. К., Черепанов А. В., Васильева. Р. П., Шакеров В. О.**//Изв. вузов. Физика. 1977. № 8. С. 128—129.
130. **Мясникова К. П., Васильева Р. П., Черемушкина А. В.** — Изв. АН СССР. Сер. Металлы. 1975. № 6. С. 185—188.
131. **Butler E. H., Pugh E. M.**//Phys. Rev. 1940. Vol. 57. P. 916—920.
132. **Черемушкина А. В., Васильева Р. П.**//Физика твердого тела. 1966. Т. 8, № 3. С. 822—825.
133. **Rinder W., Koch K. M.** Z. Naturforsch. a. 1958. Bd 13. S. 26—528.

Глава 31

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

Л. А. Новицкий

31.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В главе приведены значения оптических характеристик твердых, жидких и газообразных веществ при различных параметрах их состояния. Даны аналитические зависимости, позволяющие использовать эти значения при практических расчетах. Оговаривается достоверность приведенных значений оптических характеристик (указывается обычно средняя квадратическая относительная погрешность измерения при доверительной вероятности 0,68). В некоторых таблицах указания о погрешности измерения отсутствуют. Это соответствует случаям, когда в литературных источниках достоверность данных не была оговорена. Значения оптических характеристик в таких таблицах следует рассматривать как ориентировочные.

Определение оптических характеристик и их единицы даются в соответствии с ГОСТ 7601—78, ГОСТ 23778—79, СЭВ 1052—78, ГОСТ 13659—78, ГОСТ 15130—79, ГОСТ 9411—81 Е.

Показателем преломления n называют отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме c к фазовой скорости излучения в данной среде; n для длины волны λ=546,07 нм называют *основным показателем преломления* $n_{осн}$. Величины n и $n_{осн}$ — безразмерные.

Уменьшение интенсивности излучения в веществе в результате поглощения характеризуется *главным показателем поглощения* χ.

Величины n и χ называют *оптическими постоянными*.

Связь между оптическими постоянными, электрическими и магнитными характеристиками диэлектрической

среды, являющаяся важнейшим выводом электромагнитной теории света, определяется уравнением

$$n^2 = \varepsilon\mu,$$

а при $\mu \approx 1$

$$n^2 = \varepsilon,$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость; μ — относительная магнитная проницаемость.

Для ряда газообразных и жидких диэлектриков результаты расчета n с помощью этого уравнения хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Для металлов связь их оптических постоянных с электрическими характеристиками задается уравнениями

$$n^2(1-\chi^2) = \varepsilon$$

и

$$n^2\chi = 2\pi\sigma^*/\omega,$$

где σ^* — удельная проводимость металла; ω — круговая частота потока излучения.

Результаты расчетов по этим уравнениям достаточно хорошо согласуются с данными эксперимента в инфракрасной области спектра, где для оптических свойств металла главную роль играют свободные электроны.

В видимой и ультрафиолетовой областях спектра оптические свойства вещества в сильной степени зависят от связанных электронов. Значительно более явно выраженной становится зависимость n от длины волны потока излучения; выводы электромагнитной теории, приписывающие величине n некоторое квазипостоянное значение, характерное для данного вещества, расходятся с действительностью.

В этом случае уравнения, учитывающие длину волны (частоту) излучения, его затухание в веществе, действие окружающих молекул на смещение электрона под воздействием внешнего поля, влияние свободных и связанных электронов, выводятся из теории дисперсии и имеют вид:

для диэлектриков

$$n^2 = 1 + 4\pi\frac{e}{m}N\frac{1}{\left(\omega_0^2-\omega^2\right)^2};$$

для металлов

$$n^2(1-\chi^2) = 1 - \frac{4\pi Ne^2}{m}\frac{1}{\omega^2+(g_0/m)^2} + \sum_k \frac{4\pi N_k e^2}{m}\frac{\omega_k^2-\omega^2}{\left(\omega_k^2-\omega^2\right)^2+(g_k/m)^2\omega^2}$$

и

$$2n^2\chi = \frac{4\pi Ne^2}{m}\frac{g_0/m}{\omega\left[\omega^2+(g_0/m)^2\right]} + \sum_k \frac{4\pi N_k e^2}{m}\frac{\omega(g_k/m)}{\left(\omega_k^2-\omega^2\right)^2+(g_k/m)^2\omega^2}.$$

Здесь ω — круговая частота внешнего электромагнитного поля, определяемая длиной волны падающего потока излучения; ω_0 — круговая частота собственных колебаний свободных электронов атомов вещества, зависящая от их природы; ω_k — круговая частота собственных колебаний электронов поляризуемости; e, m — заряд и масса электрона соответственно; N, N_k — число атомов в единице объема, испытывающих поляризацию среды, соответствующее различным собственным частотам ω_k; g_0, g_k — коэффициенты сопротивления среды для частот, близких к ω_0 и ω_k соответственно.

Зная ω и σ^*, можно определить *глубину проникновения* δ излучения в металлическую среду (так называемую *толщину скин-слоя* при нормальном скин-эффекте), пользуясь уравнением

$$\delta = c\Big/\sqrt{2\pi\omega\sigma^*}.$$

Величина δ измеряется в единицах длины.

Расчет показателя преломления n для любой длины волны в пределах определенного интервала длин волн производится по дисперсионным формулам; эти формулы для различных классов материалов имеют схожее построение, но различаются обычно коэффициентами формулы дисперсии. Так, расчет n для воздуха в интервале длин волн в вакууме $\lambda = 0{,}2 \div 50$ мкм выполняется по формуле дисперсии

$$n = 1 + 64{,}328\cdot10^{-6} + \frac{29498{,}1\cdot10^{-6}}{146-10^6\lambda^{-2}} + \frac{255{,}4\cdot10^{-6}}{41-10^6\lambda^{-2}};$$

расчет n в интервале длин волн 0,365—1,0139 мкм для оптического бесцветного стекла производится по формуле дисперсии

$$n^2 = A_1 + A_2\lambda^2 + A_3\lambda^{-2} + A_4\lambda^{-4} + A_5\lambda^{-6} + A_6\lambda^{-8},$$

где A_1, ..., A_6 — коэффициенты формулы дисперсии, зависящие от марки стекла.

Средней дисперсией $n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$ называют разность показателей преломления волн длиной λ_1 и λ_2.

Основной средней дисперсией $n_{F'}-n_{C'}$ называют разность показателей преломления для длин волн F' и C' (спектральные линии Фраунгофера 479,99 и 643,85 нм соответственно).

Коэффициентом дисперсии ν_3 называют отношение вида

$$\nu_3 = (n_3-1)/(n_1-n_2),$$

где n_1, n_2, n_3 — показатели преломления, соответствующие длинам волн λ_1, λ_2 λ_3.

Основным коэффициентом дисперсии $\nu_{осн}$ называют отношение

$$\nu_{осн} = (n_{осн}-1)/(n_{F'}-n_{C'}).$$

Величины ν_3 и $\nu_{осн}$ — безразмерные.

Термооптической постоянной $\beta_{осн}$, $К^{-1}$, называют изменение основного показателя преломления при повышении температуры вещества на 1 К; $\beta_{осн}$ определяется выражением

$$\beta_{осн} = \Delta n_{осн}/\Delta T,$$

где $\Delta n_{осн}$ — изменение основного показателя преломления; ΔT — изменение температуры, К.

Коротковолновой границей пропускания λ_{min} называют длину волны со стороны более коротких волн, при которой спектральный коэффициент внутреннего пропускания для толщины вещества 10 мм не ниже 0,50. Аналогично определяется *длинноволновая граница пропускания* λ_{max}, но для длинноволновой части спектра. λ_{min} и λ_{max} измеряют в единицах длины.

Коэффициент пропускания τ представляет собой отношение потока излучения, прошедшего сквозь тело, к потоку излучения, упавшему на него.

Коэффициентом внутреннего пропускания τ^* называют отношение потока излучения, прошедшего к выходной поверхности среды, к потоку излучения, вошедшего в среду.

Коэффициентом отражения называют отношение потока излучения, отраженного данным телом, к потоку излучения, упавшего на него.

Характер отражения света поверхностью данного вещества зависит от качества ее обработки. В общем случае отражение имеет характер *направленно-рассеянного* отражения, когда максимум силы отраженного света совпадает с направлением, соответствующим закону отражения. В зависимости от того, какая из составляющих отраженного потока (зеркальная или диффузная) превалирует, отражение рассматривается как зеркальное (коэффициент зеркального отражения ρ) или как диффузное (коэффициент диффузионного отражения $\rho_{диф}$). Поверхности, для которых в отраженном потоке излучения преобладает диффузиая составляющая, в той или иной степени прнближаются к поверхностям, яркость которых не зависит от направления, а сила света убывает пропорционально косинусу угла между нормалью к поверхности н рассматриваемым направлением (равияркостные, или ламбертовские поверхности).

Коэффициентом поглощения α называют отношение потока излучения, поглощенного данным телом, к потоку излучения, упавшему иа него.

Величины τ, τ^*, ρ и α — безразмерные. Связь между τ, ρ и α устаиавливается соотношением

$$\tau + \rho + \alpha = 1.$$

Для потока излучения длины волны λ соответствующие коэффициенты обозначают τ_λ, τ^*_λ, ρ_λ и α_λ *(спектральные коэффициенты пропускания, внутреннего пропускания, отражения и поглощения)*.

Зиачення τ, τ^*, ρ и α зависят от спектрального состава падающего на тело потока излучения. В частном случае, если излучатель имитирует Солнце, то соответствующий коэффициент дополняется в иидексе буквой S, например: коэффициент поглощения солиечного излучения α_S.

Показателем поглощения a называют величину, обратную расстоянию, на котором в результате поглощения в веществе поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в 10 раз. Для потока излучения с длиной волны λ соответствующую величину обозначают a_λ и называют *спектральным показателем поглощения*. Единицы величии a и a_λ — $м^{-1}$, $мм^{-1}$ н т. д.

Величины a_λ и χ связаны соотношением

$$a_\lambda = 4\pi\chi/\lambda,$$

а величины a и τ^*, a_λ и τ^*_λ — соотношениями

$$\tau^* = 10^{-ad}; \quad \tau^*_\lambda = 10^{-a_\lambda d},$$

где d — толщина поглощающего слоя вещества, м, мм и т. д.

Для удобства сопоставления τ^*_λ различных веществ, оптически однородных в направлении распространения излучения, коэффициент внутреннего пропускания приводят обычно к единичной толщине поглощающего слоя. Расчетная формула для такого приведеиия имеет вид

$$\lg \tau^*_{\lambda 1} = \lg \tau^*_\lambda \frac{1}{d},$$

где $\tau_{\lambda 1}$ — спектральный коэффициент внутреннего пропускания для толщины поглощающего слоя, равной единице.

Коэффициенты τ и τ^* связаны соотношением

$$\tau^* = \tau/(1-\rho)^2$$

при одинаковых коэффициентах отражения на входиой и выходной границах среды.

Оптической плотностью называют логарифм величины, обратной коэффициенту пропускаиия, т. е.

$$D = \lg(1/\tau) \text{ и } D^* = \lg(1/\tau^*).$$

Тогда

$$D^* = D + 2\lg(1-\rho).$$

Если поток излучения проходит последовательно через среды с коэффициентом пропускания τ_1, τ_2, τ_3 ... и оптическими плотностями D_1, D_2, D_3..., то для совокупности этих сред коэффициент пропускания τ и суммарная оптическая плотность D вычисляются по формулам

$$\tau = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \ldots$$

и

$$D = D_1 + D_2 + D_3 + \ldots$$

Зависимость ρ от угла падения α_1 и показателей преломления n' и n'' граничащих диэлектрических сред (излучение распространяется из среды с показателем преломления n' в среду с показателем преломления n'') определяется выражением

$$\rho = \frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(\alpha_1-\alpha_2)}{\sin^2(\alpha_1+\alpha_2)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha_1-\alpha_2)}{\operatorname{tg}^2(\alpha_1+\alpha_2)}\right],$$

где α_2 — угол преломления.

Величины α_1 и α_2 связаны законом преломления:

$$n' \sin\alpha_1 = n'' \sin\alpha_2.$$

При нормальном падении

$$\rho = \left(\frac{n''-n'}{n''+n'}\right)^2.$$

При нормальном падении потока излучения из воздуха на металлическую поверхность

$$\rho = \frac{(n''-1)^2+\chi^2(n'')^2}{(n''+1)^{-1}+\chi^2(n'')^2}.$$

Для оптически активных веществ дополнительно вводятся специфические характеристики, поясняемые ниже.

Показатель преломления обыкновенного луча n_o представляет собой отношение скорости электромагнитиого излучения в вакууме к фазовой скорости обыкиовенного луча с длиной волны λ в анизотропной среде.

Показателем преломления необыкновенного луча n_e называют отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме к фазовой скорости необыкновенного луча с длиной волны λ в анизотропной среде. Если распространение необыкновеиного луча рассматривается в направлении, перпендикулярном оптической оси анизотропной среды (одноосная анизотропия), или в направлении, перпендикулярном биссектрисе угла между оптическими осями (двухосная анизотропия), то n_e называют *главным показателем преломления необыкновенного луча* (ГПП).

Важной характеристикой анизотропных тел является *показатель двулучепреломления* b, представляющий собой разиость между главным показателем преломления необыкновенного луча в анизотропной среде и показателем преломления обыкновенного луча, т. е.

$$b = n_e - n_o.$$

Оптическим коэффициентом напряжения B, $Па^{-1}$ называют коэффициеит пропорциональности между показателем двулучепреломления b, обусловленного механическими деформациями, и разностью главных нормальных напряжений $\sigma_2 - \sigma_1$, возникающих при этих де-

формациях, плоскости действия которых совпадают с плоскостями поляризации лучей *e* и o.

Если деформируемый образец уподобить одноосному кристаллу, а падающий параллельный пучок лучей направить перпендикулярно сжимающей (растягивающей) силе, то зависимость между $n_e - n_o$ и $\sigma_2 - \sigma_1$ принимает вид

$$n_e - n_o = B(\sigma_2 - \sigma_1).$$

Значение величины B для соответствующего вещества зависит от длины волны и температуры.

Для кристаллов низшей категории, оптическая индикатриса которых является трехосным эллипсоидом с тремя неравными единично-перпендикулярными осями, показатели преломления в направлении большой, средней и малой осей называют *большим* (n_G), средним (n_m) и *малым* (n_p) *показателями преломления*.

Относительная степень поляризации P_λ представляет собой отношение разности интенсивностей пучков лучей с длиной волны λ, поляризованных ортогонально, к их сумме. Величина P_λ — безразмерная.

Углом полной поляризации (углом Брюстера) α_B называют угол падения, при котором отраженный луч полностью поляризован перпендикулярно плоскости падения. Величина α_B определяется выражением

$$\alpha_B = \operatorname{arctg}((n''/n').$$

В частном случае, при $n' = 1$,

$$\alpha_B = \operatorname{arctg} n''.$$

Удельный угол вращения плоскости поляризации ψ_0, угл. град/мм, представляет собой угол, на который поворачивает плоскость поляризации образец кристалла толщиной 1 мм.

Угол вращения плоскости поляризации ψ средой толщиной d (вдоль хода луча) определяется из выражения

$$\psi = \psi_0 d.$$

Для описания веществ, являющихся в нормальных условиях оптически изотропными, но при определенных внешних условиях становящихся анизотропными, служат специальные оптические характеристики.

Магнитооптической постоянной Верде C_λ, угл. мин/(Тл·м), называют коэффициент пропорциональности между углом вращения плоскости поляризации ψ, обусловленным наложением магнитного поля (вектор напряженности магнитного поля совпадает с направлением распространения оптического излучения в данной среде), и произведением напряженности внешнего магнитного поля H на геометрическую длину пути l излучения в веществе.

Зависимость между ψ и C_λ имеет вид

$$\psi = C_\lambda l H.$$

Для соответствующего вещества C_λ зависит от длины волны и температуры.

Электрооптической постоянной Керра B_λ, м/В^2, называют коэффициент пропорциональности между показателем двулучепреломления b и произведением длины волны в вакууме λ на напряженность E внешнего электрического поля во второй степени, вектор напряженности которого перпендикулярен направлению распространения излучения в данной среде.

Зависимость между b и B_λ имеет вид

$$b = B_\lambda E^2.$$

Значение B_λ зависит от длины волны и температуры вещества.

Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) в кристаллах оценивают с помощью *электрооптических коэффициентов* r_{ik}, связывающих поляризационные характеристики веществ с напряженностью E внешнего электрического поля. Индексы i и k соответствуют определенному углу между направлениями оптической оси кристалла и электрического поля. В случае параллельности этих направлений $i=6$ и $k=3$, т. е. $r_{ik} = r_{63}$.

Максимальное искусственное двулучепреломление, образующееся при распространении света вдоль оси кристалла z, определяется выражением

$$b_{\max} = \frac{n_o^3}{2} r_{63} E_z,$$

где E_z — составляющая напряженности внешнего поля, параллельная направлению z.

При исследовании процессов теплообмена, вычислении температуры тел и других тепловых расчетах используются оптические характеристики, определяющие тепловое излучение тел.

Коэффициент теплового излучения ε_T — отношение энергетической светимости теплового излучателя M_e к энергетической светимости черного тела M_e^0 при той же температуре в пределах пространственного угла 2π.

Спектральный коэффициент теплового излучения ε_λ — отношение спектральной плотности энергетической светимости теплового излучателя $M_{e\lambda}$ к спектральной плотности энергетической светимости черного тела $M_{e\lambda}^0$ при той же температуре и той же длине волны в пределах пространственного угла 2π.

Величины ε_T и ε_λ — безразмерные.

Расчетные формулы имеют вид

$$M_e = \varepsilon_T M_e^0 = \varepsilon_T \sigma \left(T^4 - T_1^4\right);$$

$$M_{e\lambda} = \varepsilon_\lambda M_{e\lambda}^0 = \varepsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \left[\exp(C_2/\lambda T) - 1\right]^{-1},$$

где $\sigma = 5{,}6687 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2·К^4) — постоянная Стефана—Больцмана; T — температура исследуемой излучающей поверхности, К; T_1 — температура среды, находящейся в тепловом равновесии с исследуемой поверхностью, К; $C_1 = 3{,}7415 \cdot 10^{-16}$ Вт·м^2; $C_2 = 1{,}43880 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Единицы M_e и $M_{e\lambda}$ — Вт/м^2 и Вт/м^3 соответственно.

В ряде случаев спектральную плотность энергетической светимости черного тела удобнее представить в виде функции частоты излучения ν. В этом случае

$$M_{e\nu}^0 = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1\right]^{-1}.$$

Связь между ε_T и ε_λ устанавливается соотношением

$$\varepsilon_T = \int_0^\infty \varepsilon_\lambda M_{e\lambda}^0 \, d\lambda / \sigma T^4.$$

В объектах новой техники коэффициент ε_T используется для расчетов процессов теплообмена совместно с коэффициентом поглощения α_S. В частности, при расчете температуры материалов и покрытий, облучаемых солнечным излучением, широко используют коэффициенты ε_T и α_S. В тех случаях, когда теплообменом в результате теплопроводности и конвекции можно пренебречь по сравнению с лучистым теплообменом, температура излучающей поверхности полностью определяется значениями ε_T и α_S и может быть вычислена по формуле

$$T = \sqrt[4]{\frac{Q}{\sigma} \frac{\alpha_S}{\varepsilon_T}},$$

где Q — удельный тепловой поток солнечного излучения на границе земной атмосферы в направлении нормали к облучаемой поверхности ($Q \approx 1400$ Вт/м²).

Если сравнивают энергетические светимости (или их спектральные плотности) реальных излучателей и черного тела не в пределах угла 2π, а в направлении нормали к излучающей поверхности, то коэффициенты излучения обозначают ε_T^n и ε_λ^n.

Более подробные сведения по рассмотренным выше вопросам можно найти в специальной литературе:

[1—6] — по измерениям в области новой техники;

[7—9] — по поляризационным материалам;

[10—13] — по различным видам оптических излучателей;

[14, 15] — по измерениям при высоких температурах;

[16] — по теории отражения света;

[17] — по оптическим свойствам металлов.

Следует рекомендовать также специальные справочники, содержащие дополнительные сведения по оптическим свойствам веществ, в частности [17—24]

В табл. 31.1—31.76 приведены оптические характеристики для различных материалов и веществ.

31.2. ОПТИЧЕСКИЕ СТЕКЛА

Таблица 31.1. Оптические характеристики кроновых стекол [25]

Характеристика	Марка стекла										
	ЛК6	ЛК7	К8	БК6	БК8	БК10	ТК2	ТК14	ТК16	ТК20	КФ4
$n_{осн}$ [*1]	1,472142	1,484608	1,518294	1,542136	1,548861	1,571309	1,574860	1,615506	1,615192	1,624702	1,520270
$\nu_{осн}$	66,64	66,17	63,87	59,40	62,56	55,77	57,20	60,33	58,08	56,43	58,71
n для длины волны лазера, нм:											
488,0	1,47521	1,48777	1,52181	1,54612	1,55268	1,57580	1,57926	1,61996	1,61983	1,62955	1,52413
514,0	1,47371	1,48622	1,52009	1,54417	1,55081	1,57359	1,57710	1,61778	1,61756	1,62717	1,52224
520,8	1,47336	1,48586	1,51968	1,54371	1,55037	1,57307	1,57659	1,61726	1,61702	1,62661	1,52179
530,0	1,47290	1,48538	1,51916	1,54311	1,54979	1,57240	1,57593	1,61659	1,61633	1,62589	1,52121
568,2	1,47121	1,48363	1,51722	1,54093	1,54770	1,56995	1,57353	1,61416	1,61379	1,62324	1,51910
632,8	1,46897	1,48131	1,51466	1,53807	1,54494	1,56676	1,57040	1,61096	1,61048	1,61979	1,51632
647,1	1,46855	1,48088	1,51419	1,53755	1,54442	1,56618	1,56982	1,61037	1,60987	1,61916	1,51581
694,3	1,46732	1,47960	1,51279	1,53600	1,54292	1,56448	1,56814	1,60864	1,60810	1,61732	1,51431
890,0	1,46371	1,47585	1,50872	1,53170	1,53861	1,55974	1,56346	1,60375	1,60313	1,61219	1,51002
1060,0	1,46146	1,47352	1,50625	1,52920	1,53604	1,55709	1,56081	1,60090	1,60032	1,60932	1,50748
$\vartheta_{осн}$, 10^{-7} 1/К, в интервале температур, К:											
от 213 до 293	—22	+36	+ 6	—	+16	+19	+15	— 1,0	+ 0,7	+ 2	+18,4
от 293 до 393	— 7	+52	+21	—	+32	+35	+30	+11,6	+15,8	+15	+34,0
τ_λ^* ($\lambda = 560$ нм) для d, мм;											
10	0,993	0,991	0,996	0,996	0,995	0,996	0,995	0,996	0,996	0,996	0,996
100	0,932	0,917	0,958	0,958	0,956	0,957	0,953	0,958	0,962	0,957	0,959
λ_{min}, нм	321	318	320	322	325	336	318	346	347	347	327
B, 10^{-12} Па$^{-1}$, для $\lambda = 0,55$ мкм	3,70	3,45	3,20	2,60	2,80	2,90	2,70	1,80	1,80	1,85	2,90

[*1] Здесь и далее значения показателей преломления приведены с погрешностью $\pm 1 \cdot 10^{-5}$.

Таблица 31.2. **Оптические характеристики флинтовых стекол [25]**

Характеристика	Марка стекла								
	БФ12	БФ16	БФ24	ЛФ5	Ф1	Ф6	ТФ1	ТФ3	ТФ5
$n_{осн}$	1,629837	1,674385	1,638639	1,578326	1,616878	1,607015	1,652188	1,723166	1,761712
$\nu_{осн}$	38,82	47,00	36,50	41,03	36,69	37,68	33,62	29,29	27,32
n для длины волны лазера, нм:									
488,0	1,63705	1,68073	1,64643	1,58457	1,62436	1,61417	1,66085	1,73425	1,77426
514,0	1,63348	1,67761	1,64258	1,58149	1,62066	1,61063	1,65656	1,728774	1,76802
520,8	1,63265	1,67688	1,64168	1,58076	1,61979	1,60980	1,65555	1,72745	1,76657
530,0	1,63157	1,67593	1,64052	1,57983	1,61868	1,60873	1,65427	1,72581	1,76470
568,2	1,62770	1,67250	1,63634	1,57647	1,61467	1,60489	1,64964	1,71992	1,75806
632,8	1,62276	1,66809	1,63103	1,57215	1,60955	1,59998	1,64378	1,71250	1,74971
647,1	1,62187	1,66728	1,63007	1,57137	1,60863	1,59910	1,64272	1,71117	1,74822
694,3	1,61930	1,66496	1,62732	1,56912	1,60597	1,59655	1,63970	1,70738	1,74397
890,0	1,61247	1,65864	1,62000	1,56303	1,59889	1,58973	1,63172	1,69751	1,73299
1060,0	1,60894	1,65527	1,61623	1,55979	1,59522	1,58616	1,62767	1,69263	1,72765
$\beta_{осн}$, 10^{-7} K^{-1}, в интервале температур, К:									
от 213 до 293	+12,6	+ 6	+35	+25,4	+30,6	+30	+18,4	+49	+62,0
от 293 до 393	+30,5	+24	+56	+44,7	+52,5	+49	+42,4	+72	+89,0
τ_λ^* ($\lambda = 560$ нм) для d, мм:									
10	0,996	0,996	0,995	0,995	0,996	0,995	0,996	0,996	0,996
100	0,959	0,963	0,954	0,954	0,960	0,953	0,962	0,960	0,960
λ_{min}, нм	347	362	364	335	346	343	355	372	385
B, 10^{-12} $Па^{-1}$, для $\lambda = 0{,}55$ мкм	2,50	1,60	2,60	3,20	2,90	2,95	2,50	1,80	1,45

Таблица 31.3. **Коэффициенты формулы дисперсии кроновых стекол [25]**

A_i*1	Марка стекла				
	ЛК6	ЛК7	К8	БК8	БК10
A_1	2,1391711	2,1732195	2,2699804	2,3601309	2,4193499
A_2, 10^{-3}	−9,8913489	−9,4960367	−9,8250605	−10,118581	−7,6662143
A_3, 10^{-3}	8,4704778	9,7105457	11,017203	11,761749	15,535897
A_4, 10^{-4}	2,8247761	1,0540599	0,76606834	2,4663544	−1,8549105
A_5, 10^{-5}	−1,9072939	−0,38188276	1,1616952	−1,2819625	6,0646835
A_6, 10^{-7}	9,3359448	5,0116854	5,8130900	9,3405641	−27,567697

Продолжение табл. 31.3

A_i*1	Марка стекла				
	ТК2	ТК14	ТК16	ТК20	КФ4
A_1	2,4321820	2,5615496	2,559113	2,5854315	2,2723952
A_2, 10^{-3}	−8,2232823	−10,649249	−9,8827859	−9,0796080	−9,3640165
A_3, 10^{-3}	14,772427	14,719854	14,212686	16,291552	11,794006
A_4, 10^{-4}	−0,17487909	1,6374569	5,9116562	1,7763493	1,7956625
A_5, 10^{-5}	3,4620141	0,77935463	−5,4050675	0,85249807	120,49614
A_6, 10^{-7}	−14,790076	−1,1965516	32,017380	0,25484363	3,8219544

*1 Расчет показателей преломления с помощью коэффициентов формулы дисперсии обеспечивает погрешность в определении n, не превышающую $\pm 1 \cdot 10^{-5}$.

Таблица 31.4. **Коэффициенты формулы дисперсии флинтовых стекол [25]**

A_i*1	Марка стекла			
	БФ12	БФ16	БФ24	ЛФ5
A_1	2,5767076	2,7308360	2,6051551	2,4246429
A_2, 10^{-3}	—7,6835879	—9,2896392	—10,884034	—7,9511272
A_3, 10^{-3}	22,692139	21,405060	20,201021	19,033590
A_4, 10^{-4}	4,1937275	2,3934677	17,331740	3,9095360
A_5, 10^{-5}	2,4633519	2,7482465	—14,260022	1,0184703
A_6, 10^{-7}	17,499673	2,8808684	108,42795	17,896964

Продолжение табл. 31.4

A_i*1	Марка стекла				
	Ф1	Ф6	ТФ1	ТФ3	ТФ5
A_1	2,5344898	2,5047749	2,6349371	2,8433701	2,9580175
A_2, 10^{-3}	—8,9233727	—7,8584593	—8,5077204	—8,5219322	—8,2686725
A_3, 10^{-3}	22,149725	22,129689	26,185673	33,994123	39,383391
A_4, 10^{-4}	6,9286357	4,2000253	7,5510993	12,311168	12,219807
A_5, 10^{-5}	—0,0061831815	2,3483839	1,5001867	—1,4893638	3,1433368
A_6, 10^{-7}	30,937650	18,712023	36,330948	93,877638	86,507903

*1 Расчет показателей преломления с помощью коэффициентов формулы дисперсии обеспечивает погрешность в определении n, не превышающую $\pm 1 \cdot 10^{-5}$.

Таблица 31.5. **Границы и спектральные коэффициенты внутреннего пропускания кварцевых стекол [25]**

Характеристика	Марка стекла				
	КУ1	КУ2	КВ	КВ-Р	КИ
λ_{min}, нм	180	180	230	220	240
λ_{max}, нм	2600	2200	2200	2200	2800
τ_λ^* ($d = 10$ мм) для λ, нм:					
180	0,850	0,490	—	—	—
190	0,885	0,615	—	—	—
200	0,900	0,745	—	—	—
210	0,930	0,860	0,030	0,260	0,075
220	0,960	0,930	0,220	0,550	0,220
230	0,960	0,925	0,565	0,800	0,435
240	0,950	0,905	0,540	0,800	0,525
250	0,970	0,920	0,715	0,865	0,585
260	0,999	0,975	0,920	0,940	0,800
270	0,999	0,995	0,995	0,965	0,930
280	0,999	0,999	0,999	0,985	0,975
300—2000	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
2200	0,915	0,915	0,915	0,915	0,999
2400	0,980	—	—	—	0,999
2600	0,800	—	—	—	0,999
2700	0,070	—	—	—	0,999
2800	—	—	—	—	0,999

Таблица 31.6. **Показатели преломления, основной коэффициент дисперсии, коэффициенты формулы дисперсии и оптический коэффициент напряжения кварцевых стекол КУ1, КУ2, КВ, КВ-Р, КИ [25]**

Характеристика	Числовое значение
$n_{осн}$	1,460078
$\nu_{осн}$	68,00
n для длины волны лазера, нм:	
488,0	1,46299
514,0	1,46157
520,8	1,46123
530,0	1,46079
568,2	1,45918
632,8	1,45702
647,1	1,45662
694,3	1,45543
890,0	1,45190
1060,0	1,44968
A_1	2,1026513
A_2, 10^{-3}	—8,5943075
A_3, 10^{-3}	9,8576238
A_4, 10^{-4}	—4,4538022
A_5, 10^{-5}	4,4589827
A_6, 10^{-6}	—1,9692608
B, 10^{-12} Па$^{-1}$, для $\lambda = 0{,}55$ мкм	3,45

Таблица 31.7. **Оптические характеристики стекол для волоконной оптики и ситаллов [25]**
($\lambda_1 = 486{,}13$ нм; $\lambda_2 = 656{,}27$ нм)

Характеристика	Стекла для сердцевины				Стекла для оболочки		Ситаллы		
	ТК16	ФВ	ВС586	ВС682	ВО488	ВО513	СО21	СО115	СО156
$n_{осн}$	1,6152	1,6291	1,5893	1,6855	1,4898	1,5150	1,553	1,535	1,545
$n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2}$, 10^{-5}	1050	1757	1422	1298	745	795	1080	1020	1040
λ_{min}, нм	323	334	332	325	300	310	—	—	—
τ_λ^* ($d = 10$ мм) для λ, нм:									
400	0,992	0,996	0,997	0,992	0,997	0,994	—	—	—
600	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999	0,996	—	—	—
800	0,997	0,999	0,999	0,999	0,999	0,997	—	—	—
1000	0,991	0,999	0,999	0,999	0,999	0,997	—	—	—

Таблица 31.8. **Значения спектрального коэффициента диффузного отражения $\rho_{\lambda\ диф}$ светорассеивающих оптических материалов при температуре 295—300 К [26]**

λ, нм	Молочное стекло				Окись магния		Сульфат бария (прессованный порошок $BaSO_4$)
	МС 14		МС 20		копоть MgO	прессованный порошок MgO	
	зеркально полированное	матовое	зеркально полированное	матовое			
400	0,915	0,892	0,935	0,950	0,977	0,972	0,987
420	—	—	0,940	0,950	—	—	—
440	—	—	0,945	0,957	—	—	—
450	0,945	0,925	—	—	0,980	0,980	—
460	—	—	0,955	0,960	0,980	—	0,991
480	—	—	0,960	0,966	0,980	—	—
490	—	—	—	—	0,980	—	—
500	0,958	0,942	0,965	0,969	0,980	0,983	0,991
520	—	—	0,970	0,974	0,980	—	—
540	—	—	0,970	0,975	0,980	—	—
550	0,956	0,945	0,970	0,975	0,980	0,984	—
560	0,956	0,945	0,970	0,975	0,980	—	0,992
570	0,956	0,945	0,970	0,975	0,980		0,992
580	0,956	0,945	0,970	0,975	0,980	—	0,992
600	0,955	0,945	0,970	0,973	0,980	0,988	0,992
620	0,955	0,945	0,970	0,974	0,980	—	0,992
640	0,955	0,945	0,965	0,973	0,979	—	0,992
650	0,955	0,945	0,965	0,975	0,979	0,990	0,992
660	0,955	0,945	0,965	0,975	0,978	0,990	0,992
680	0,955	0,945	0,965	0,971	0,978	0,990	0,992
700	0,955	0,945	0,965	0,970	0,977	0,990	0,992
720	0,955	0,945	0,965	0,971	0,977	—	0,992
740	0,955	0,945	0,965	0,971	0,976	—	0,992
750	0,955	0,945	0,960	—	0,975	—	0,992
1000	—	—	0,935	—	—	—	0,990

Примечание: Погрешность измерения не превышает ± 1%.

Таблица 31.9. **Спектральный показатель поглощения и показатель преломления цветного стекла различных марок [27]**

λ, нм	a_λ, мм$^{-1}$, для стекол марок																	
	УФС1	УФС6	ФС6	СС2	СС4	СЗС7	СЗС22	СЗС24	ЗС11	ЖЗС6	ЖЗС12	ЖЗС17	ОС5	ИКС6	НС1	НС2	НС8	НС10	ТС10
240	0,32	>3	—	>3	>3	>3	>3	—	—	>3	>3	>3	>3	—	>3	>3	>3	>3	>3
280	0,025	1,74	0,57	2,73	>3	>3	>3	0,40	—	>3	>3	>3	>3	—	>3	>3	>3	>3	>3
320	0,004	0,13	0,084	0,15	0,68	0,75	>3	0,041	—	1,05	>3	>3	1,77	—	0,95	>3	>3	>3	>3
350	0,005	0,035	0,032	0,040	0,16	0,086	0,49	0,009	—	>3	>3	>3	1,24	—	0,10	0,29	0,75	2,30	0,41
380	0,035	0,104	0,023	0,015	0,050	0,026	0,046	0,004	4,80	>3	>3	>3	1,17	—	0,011	0,080	0,44	1,32	0,15
420	0,72	>3	0,082	0,010	0,055	0,011	0,009	0,011	1,95	1,21	>3	>3	1,16	—	0,050	0,14	0,29	0,93	0,43
450	1,07	>3	0,30	0,025	0,15	0,009	0,007	0,011	0,77	0,49	2,33	>3	0,90	—	0,081	0,29	0,27	0,87	0,67
480	1,33	>3	0,95	0,079	0,49	0,010	0,007	0,009	0,33	0,18	1,27	2,32	0,61	—	0,073	0,24	0,26	0,85	0,52
520	2,30	>3	1,75	0,24	1,34	0,034	0,028	0,010	0,15	0,056	0,66	1,50	0,36	—	0,071	0,23	0,27	0,87	0,39
550	2,50	>3	1,55	0,22	1,27	0,079	0,12	0,010	0,21	0,038	0,62	1,43	0,23	—	0,070	0,22	0,26	0,85	0,37
580	3,50	>3	2,20	0,33	1,86	0,15	0,37	0,013	0,42	0,050	0,80	1,55	0,15	—	0,072	0,23	0,27	0,88	0,31
620	3,00	>3	3,10	0,37	2,10	0,28	1,09	0,028	0,84	0,094	1,35	2,13	0,10	—	0,079	0,25	0,27	0,87	0,33
650	1,75	>3	3,40	0,38	2,10	0,39	1,99	0,047	1,12	0,11	1,66	2,43	0,080	5,70	0,076	0,25	0,27	0,86	0,29
680	0,36	2,92	2,70	0,18	1,01	0,48	>3	0,072	1,29	0,092	1,69	2,18	0,070	4,90	0,043	0,13	0,26	0,81	0,15
720	0,080	0,41	0,43	0,009	0,049	0,57	>3	0,12	1,41	0,070	1,69	1,88	0,063	3,70	0,030	0,070	0,25	0,73	0,10
750	0,11	0,30	0,067	—	0,008	0,61	>3	0,16	1,42	0,050	1,63	1,79	0,060	2,75	0,020	0,060	0,26	0,74	0,12
780	0,15	0,47	0,014	—	0,005	0,62	>3	0,22	1,43	0,029	1,59	1,87	0,060	2,00	0,024	0,065	0,29	0,79	0,12
840	0,22	0,78	0,014	—	0,008	0,60	>3	0,34	1,39	0,014	1,52	1,84	0,060	0,99	0,038	0,095	0,35	0,87	0,21
920	0,26	0,94	0,029	0,002	0,016	0,50	>3	0,54	1,22	0,010	1,38	1,64	0,060	0,32	0,044	0,11	0,42	0,98	0,26
1000	0,23	0,99	0,064	0,005	0,037	0,39	>3	0,75	0,99	0,010	1,20	1,48	0,060	0,11	0,050	0,12	0,49	1,10	0,28
1200	0,40	1,51	0,38	0,050	0,27	0,21	>3	0,96	0,50	0,010	0,73	0,96	0,056	0,022	0,040	0,13	0,51	1,06	0,27
1400	0,49	1,41	0,55	0,047	0,36	0,11	2,05	1,01	0,41	0,010	0,44	0,60	0,050	0,017	0,040	0,10	0,36	0,71	0,20
1800	0,43	1,58	0,53	0,043	0,37	0,028	0,45	0,70	0,22	0,010	0,22	0,42	0,032	0,009	0,040	0,090	0,24	0,46	0,18
2460	0,23	1,84	0,17	—	0,048	0,006	0,15	0,68	0,080	0,010	0,16	0,35	0,030	0,013	0,040	0,080	0,15	0,26	0,15
3000	1,10	0,53	0,37	0,13	0,24	0,11	1,93	0,77	0,11	0,11	0,21	0,55	0,15	0,090	0,13	0,22	0,62	0,63	0,23
n для λ=589,29 нм	1,540	1,520	1,495	1,520	1,520	1,514	1,535	1,516	1,550	1,522	1,527	1,527	1,523	1,541	1,521	1,523	1,503	1,509	1,523

31.3. ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ, МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.10. **Показатели преломления исландского шпата при температуре 291 К [28]**

λ, нм	n_o	n_e (ГПП)
200	1,90284	1,57649
312	1,71425	1,51140
410	1,68014	1,49640
434	1,67552	1,49430
467	1,67024	1,49190
486	1,66785	1,49074
508	1,66527	1,48956
533	1,66277	1,48841
560	1,66046	1,48736
589	1,65835	1,48640
643	1,65504	1,48490
656	1,65437	1,48459
670	1,65367	1,48426
768	1,64974	1,48259
801	1,64869	1,48216
905	1,64578	1,48098
946	1,64480	1,48060
1042	1,64276	1,47985
1097	1,64167	1,47948
1159	1,64051	1,47910
1229	1,63926	1,47870

Таблица 31.11. **Показатели преломления кристаллического кварца при температуре 291 К [21]**

λ, нм	n_o	n_e (ГПП)
214	1,63039	1,64262
250	1,60032	1,61139
303	1,57695	1,58720
340	1,56747	1,57738
405	1,55716	1,56671
436	1,55379	1,56322
468	1,55103	1,56037
480	1,55012	1,55943
509	1,54823	1,55747
589	1,54425	1,55335
628	1,54282	1,55188
656	1,54190	1,55093
707	1,54049	1,54947
766	1,53907	1,54801
845	1,53752	1,54640
1000	1,53503	1,54381
1080	1,53387	1,54260
1400	1,52972	1,53826
1530	1,52800	1,53646
1600	1,52703	1,53545
1800	1,52413	1,53242
2172	1,51799	1,52609

Таблица 31.12. **Удельный угол вращения плоскости поляризации кристаллического кварца при температуре 293 К [29]**

λ, нм	ψ_o, град/мм	λ, нм	ψ_o, град/мм
215	236,0	486	32,76
279	114,5	500	30,78
405	48,90	518	28,62
434	41,92	589	21,72
448	39,24	656	17,25

Таблица 31.13. **Оптические характеристики бесцветной слюды (мусковит) при температуре 291 К [29]**

λ, мкм	n_G	n_m	n_p	τ_λ^* (d=0,03 мм)
0,589	1,594	1,590	1,561	—
1,0	1,593	1,586	1,554	0,98
1,5	1,586	1,579	1,548	0,92
2,0	1,575	1,572	1,544	0,98
2,5	1,562	1,562	1,535	0,90
3,0	—	—	—	0,95

Таблица 31.14. **Относительная степень поляризации и спектральный коэффициент пропускания поляроидов [29]**

Толщина анизотропной пленки в поляроидах 0,2 мм; погрешность измерения ± 5%

λ, нм	Герапатитовый поляроид		Поливиниловый поляроид	
	P_λ, %	τ_λ	P_λ, %	τ_λ
400	—	0,02	100	0,26
450	—	0,15	100	0,37
500	98,7	0,27	100	0,40
550	99,0	0,32	100	0,37
600	99,0	0,34	100	0,35
650	98,5	0,36	100	0,38
700	98,2	0,36	100	0,42
750	91,5	0,40	100	0,45
800	67,8	0,44	98	0,50
850	41,2	0,50	72	0,59
900	28,2	0,54	32	0,80

Таблица 31.15. **Показатели преломления натриевой селитры [29]**

λ, мкм	n_o	n_e (ГПП)
0,434	1,6126	1,3404
0,486	1,5998	1,3384
0,501	1,5968	1,3379
0,546	1,5899	1,3365
0,578	1,5860	1,3363
0,589	1,5848	1,3360
0,656	1,5791	1,3347
0,668	1,5783	1,3345

Таблица 31.16. **Постоянная Верде магнитооптических материалов при температуре от 293 до 300 К [13]**

Материал	λ, нм	C_λ, 10^{-6} угл. мин/(Тл·м)
Арсенид галлия	1060	0,30
Бензин	589,3	0,297
Вода	486,0	0,0190
	589,3	0,0131
Железо-иттриевый гранат	632,8	85
	1000—2000	300
Иодистый литий	632,8	0,0823
Кварц кристаллический ($\perp c$)	589,3	0,0166
Кварц плавленый	437	0,0283
	486	0,0223
	548	0,0172
	633	0,0130
Кремний	1300	0,10
Сернистый кадмий	632,8	0,33
Сернистый цинк	666,0	0,234
Сероуглерод	486,0	0,0670
	589,3	0,0420
Спирт метиловый	589,3	0,00944
Спирт этиловый	589,3	0,0111
Стекло бескислородное:		
ИКС22	1150	0,087
	3390	0,005
ИКС23	1150	0,052
	3390	0,006
ИКС24	1150	0,120
	3390	0,005
ИКС25	1150	0,135
	3390	0,010
ИКС26	1150	0,066
	3390	0,006
ИКС28	1150	0,095
	3390	0,015
ИКС29	1150	0,097
	3390	0,011
ИКС30	1150	0,085
	3390	0,014
ИКС31	1150	0,100
	3390	0,009
ИКС32	3390	0,014
Стекло As — S (20% TeO_2)	1100	0,065
Стекло Ge^{3+} — P[*1]	500	—0,326
Стекло PbSi	632	0,053
	700	0,071
	1000	0,032
Стекло Pr^{3+}	670	—0,243
Стекло оптическое бесцветное:		
ЛК7	589	0,016
К8	589	0,017
БК6	589	0,019
БК8	589	0,018
БК10	589	0,020
ТК2	589	0,019
ТК14	589	0,018
ТК16	589	0,019
ТК20	589	0,020
КФ4	589	0,019
БФ12	589	0,034
БФ16	589	0,026
БФ24	589	0,039
ЛФ5	589	0,032
Ф1	589	0,038
Ф6	589	0,037
ТФ1	589	0,044
Сурьмянистый индий	15 000	12
Фторид европия	600	—1,0

Продолжение табл. 31.16

[*1] Для левовращающих материалов $C_\lambda < 0$.

Таблица 31.17. **Постоянная Керра жидких и газообразных электрооптических материалов [30]**

Вещество	λ, нм	T, К	B_λ, м/В²
Азот	546	330	$4{,}44 \cdot 10^{-18}$
Бензол	546	293	$5{,}56 \cdot 10^{-15}$
Вода	546	293	$5{,}55 \cdot 10^{-14}$
Карбосульфид парообразный	546	293	$4{,}0 \cdot 10^{-16}$
Монобромнафталин	639	293	$1{,}01 \cdot 10^{-13}$
Нитробензол жидкий	500	293	$5{,}5 \cdot 10^{-12}$
То же	525	293	$5{,}2 \cdot 10^{-12}$
»	550	293	$5{,}0 \cdot 10^{-12}$
»	575	293	$4{,}5 \cdot 10^{-12}$
»	600	293	$4{,}3 \cdot 10^{-12}$
»	625	293	$4{,}1 \cdot 10^{-12}$
»	650	293	$4{,}0 \cdot 10^{-12}$
»	675	293	$3{,}7 \cdot 10^{-12}$
»	700	293	$3{,}6 \cdot 10^{-12}$
»	750	293	$3{,}5 \cdot 10^{-12}$
»	800	293	$3{,}4 \cdot 10^{-12}$
Нитробензол парообразный	546	330	$3{,}0 \cdot 10^{-16}$
Нитротолуол	639	293	$1{,}4 \cdot 10^{-12}$
Сероуглерод	546	293	$3{,}89 \cdot 10^{-14}$
Сероуглерод парообразный	546	293	$4{,}0 \cdot 10^{-17}$
Хлорбензол	546	293	$1{,}11 \cdot 10^{-13}$

Таблица 31.18. **Электрооптический коэффициент и показатель преломления кристаллических электрооптических материалов при температуре 293 К и длине волны 546 нм [31]**

Материал	r_{63}, 10^{-12} м/В	n_o	n_e (ГПП)
Дигидроарсенат калия	10,9	1,520	1,570
Дигидроарсенат рубидия	13,0	1,520	1,560
Дигидрофосфат аммония	5,5	1,526	1,480
Дигидрофосфат калия	9,7	1,510	1,468
Дидейтерофосфат аммония	8,0	1,519	1,476
Дидейтерофосфат калия	26,4	1,510	1,470

Таблица 31.19. **Спектральный коэффициент пропускания дигидрофосфата аммония толщиной 1 мм при температуре 293 К [32]**

λ, нм	$\tau_{\lambda 1}$	λ, нм	$\tau_{\lambda 1}$
200	0,62	800	0,95
300	0,77	900	0,94
400	0,83	1000	0,90
500	0,88	1100	0,80
600	0,92	1200	0,60
700	0,96	1300	0,20

31.4. ОПТИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛЫ И ОПТИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА

Таблица 31.20. Спектральный коэффициент внутреннего пропускания $\tau^*_{\lambda 1}$ оптических кристаллов толщиной 1 мм при температуре 293 К для луча обыкновенного

Образцы — полированные диски. Погрешность измерения ± 5%

λ, мкм	AgCl [21]	Al_2O_3*1 [21]	BaF_2 [21]	CaF_2 [21]	CsI [33]	CuBr [21]	CuCl [21]	Ge [21]	KBr [34]	KCl [21]	KRS-5 [35]	LiF [36]	NaCl [19]	NaF [21]
1,0	—	0,870	0,996	0,997	0,984	—	0,878	—	0,991	0,995	0,819	0,919	0,940	—
2,0	0,944	0,900	0,996	0,994	0,984	0,885	0,932	0,548	0,991	0,995	0,841	0,919	0,950	—
3,0	0,949	0,910	0,996	0,993	0,984	0,914	0,932	0,700	0,991	0,994	0,846	0,926	0,950	—
4,0	0,952	0,870	0,996	0,991	0,981	0,914	0,939	0,707	0,991	0,991	0,846	0,933	0,940	—
5,0	0,954	0,770	0,996	0,991	0,981	0,914	0,939	0,714	0,991	0,992	0,846	0,940	0,590	—
6,0	0,956	0,520	0,996	0,993	0,981	0,914	0,939	0,714	0,992	0,992	0,846	0,864	0,520	—
7,0	0,956	0,500	0,996	0,990	0,981	0,914	0,939	0,707	0,992	0,993	0,846	0,753	—	—
8,0	0,956	—	0,994	0,975	0,979	0,914	0,939	0,707	0,992	0,994	0,846	0,634	—	0,960
9,0	0,956	—	0,993	0,930	0,979	0,914	0,939	0,700	0,992	0,994	0,852	—	—	0,950
10,0	0,956	—	0,987	—	0,979	0,914	0,939	0,693	0,992	0,995	0,852	—	—	0,930
11,0	0,956	—	0,987	—	0,977	0,914	0,939	0,678	0,993	0,995	0,852	—	—	0,870
12,0	0,956	—	0,903	—	0,977	0,914	0,936	0,671	0,993	0,995	0,852	—	—	0,780

*1 Сапфир.

Таблица 31.21. Показатель преломления n_o луча обыкновенного для оптических кристаллов при температуре 293 К [37]

λ, нм	AgCl	Al_2O_3 (сапфир)	BaF_2	CaF_2	CsI	Ge	KBr	KCl	KRS-5	LiF	NaCl	NaF
199,0	—	—	—	1,4964	—	—	—	—	—	1,4402	—	—
340,4	—	—	—	1,4477	—	—	1,6172	1,5271	—	1,4036	1,5861	—
404,7	—	—	—	1,4415	—	—	1,5899	1,5100	—	1,3985	1,5666	—
486,1	—	—	—	1,4370	—	—	1,5719	1,4982	—	1,3948	1,5533	—
589,3	—	1,56780	—	1,4338	—	—	1,5600	1,4902	—	1,3920	1,5442	—
656,3	—	—	—	1,4325	—	—	1,5552	1,4870	—	1,3908	1,5405	—
766,5	—	—	—	1,4309	—	—	1,5502	1,4835	—	1,3893	1,5366	1,32305
863,0	—	—	—	1,4299	—	—	1,5472	1,4815	—	1,3883	1,5343	—
1000	2,02239	1,75660	1,4686	1,4289	1,7576	—	1,5445	1,4799	2,4474	1,3872	1,5322	1,32174
1060 [38]	—	—	1,4681	1,4285	—	—	1,5430	—	—	1,3866	—	1,3210
1200	2,01582	—	1,4675	1,4278	1,7530	—	1,5421	1,4779	2,4258	1,3856	1,5302	1,3205
1500	2,01047	1,74650	1,4663	1,4263	1,7494	—	1,5399	1,4769	2,4089	1,3832	1,5284	1,3189
2000	2,00615	1,73753	1,4647	1,4239	1,7465	4,116	1,5383	1,4754	2,3962	1,3788	1,5268	1,3170
2500	2,00386	—	1,4630	1,4211	1,7451	4,072	1,5374	1,4745	2,3903	1,3733	1,5255	1,3155
3000	2,00230	—	1,4612	1,4179	1,7444	4,045	1,5368	1,4736	2,3869	1,3666	1,5244	1,3133
4000	1,99983	1,62675	1,4570	1,4097	1,7434	—	1,5357	1,4721	2,3841	1,3495	1,5220	1,3085
5000	1,99745	—	1,4511	1,3990	1,7427	—	1,5345	1,4704	2,3810	1,3267	1,5190	1,3015
6000	1,99483	—	1,4441	1,3856	1,7421	—	1,5332	1,4684	2,3791	1,2975	1,5155	1,2930
8000	1,98847	—	1,4259	1,3499	1,7409	—	1,5302	1,4633	2,3757	—	1,5066	1,2705
10 000	1,98034	—	1,4014	—	1,7395	4,0025	1,5264	1,4570	2,3719	—	1,4949	1,2380
10 600 [38]	—	—	1,3900	—	—	4,0020	1,5250	—	—	1,0500	—	1,2200
12 000	1,97026	—	—	—	1,7378	4,0018	1,5217	1,4480	2,3673	—	1,4801	1,1820
15 000	1,95113	—	—	—	1,7347	4,0014	1,5129	1,4320	2,3592	—	1,4515	—
20 000	1,90688	—	—	—	1,7280	—	1,4926	1,3998	2,3417	—	—	—
25 000	—	—	—	—	1,7192	—	1,4642	—	2,3186	—	—	—
30 000	—	—	—	—	1,7077	—	—	—	2,2896	—	—	—
40 000	—	—	—	—	1,6785	—	—	—	2,2113	—	—	—
50 000	—	—	—	—	1,6369	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 31.22. **Спектральный коэффициент пропускания оптической керамики толщиной 1 мм при температуре 293 К [20]**

Погрешность измерения ± 5%

λ, мкм	$\tau_{\lambda 1}$ для керамики на основе					
	Al_2O_3	CdTe	MgF_2	ZnS	ZnSe	Y_2O_3[39]
1	—	—	—	0,73	—	—
2	0,17	0,65	0,90	0,92	0,28	0,42
3	0,24	0,43	0,92	0,93	0,34	0,45
4	0,29	0,55	0,95	0,93	0,43	0,49
5	0,34	0,46	0,92	0,93	0,53	0,53
6	0,29	0,47	0,94	0,93	0,57	0,51
7	0,068	0,48	0,88	0,93	0,55	0,43
8	0,022	—	0,44	0,93	0,54	0,29
9	—	—	0,20	0,93	0,53	0,13
10	—	—	—	0,91	0,54	0,022
11	—	—	—	0,89	0,54	—
12	—	—	—	0,87	0,51	—
13	—	—	—	0,83	0,50	—
14	—	—	—	0,73	0,50	—

Продолжение табл. 31.22

31.5. ЛАКОКРАСОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.23. **Коэффициент теплового излучения промышленных эмалей при 293 К [40]**

Образцы в виде слоев эмали на металлической подложке. Погрешность измерения ± 7%

Марка эмали	Толщина слоя эмали, мкм	ε_T^n при облучении эмали от черного тела, нагретого до температуры, К									
		500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750
Автоэмаль синтетическая № 891 (вишневая)	20	0,20	0,17	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05
	30	0,25	0,22	0,18	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,10
	60	0,38	0,34	0,29	0,25	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17
	100	0,47	0,43	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28	0,27	0,26	0,26
Автоэмаль синтетическая № 835 (синяя)	20	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05
	30	0,17	0,15	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10
	60	0,28	0,25	0,24	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19	0,18
	100	0,38	0,36	0,35	0,34	0,33	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27
МЛ-12-02	20	0,18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17
	30	0,24	0,23	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22
	60	0,37	0,36	0,35	0,35	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,32
	100	0,46	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,43	0,42	0,41	0,40
МЧ-13 (электрик)	20	0,23	0,20	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
	30	0,30	0,27	0,24	0,21	0,20	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17
	60	0,45	0,40	0,35	0,32	0,30	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28
	100	0,55	0,48	0,45	0,41	0,40	0,38	0,37	0,37	0,37	0,36
МЧ-13 (вишневая)	20	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
	30	0,21	0,19	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15
	60	0,33	0,30	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
	100	0,41	0,40	0,39	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,39	0,39
ФСХ № 15 (голубая)	20	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	30	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
	60	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
	100	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
ФСХ № 26 (красно-коричневая)	20	0,05	0,12	0,14	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10
	30	0,10	0,15	0,20	0,21	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13
	60	0,15	0,25	0,30	0,32	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23	0,22
	100	0,22	0,32	0,38	0,40	0,38	0,36	0,34	0,33	0,32	0,30

Таблица 31.24. Коэффициент поглощения солнечного излучения терморегулирующих однослойных покрытий при температуре 293—300 К

Погрешность измерения ±7%

Тип покрытия	α_S	Литература	Тип покрытия	α_S	Литература
Грунтовка мелкозернистая на магниевой подложке	0,94	[41]	КО-990 на дуралюминиевой подложке	0,31	[44]
Диоксид титана:			КО-990 на медной подложке	0,28	[44]
белый	0,19	[41]	КЛ-990 на стальной подложке	0,66	[44]
серый	0,87	[41]	УР-231 на дуралюминиевой подложке	0,34	[44]
Краска:			УР-231 на медной подложке	0,31	[44]
алюминиевая на окисленной алюминиевой подложке	0,42	[41]	УР-231 на стальной подложке	0,69	[44]
белая акриловая	0,26	[42]	ФБР-74Д на дуралюминиевой подложке	0,38	[44]
белая неорганическая	0,13	[41]	ФБР-74Д на медной подложке	0,34	[44]
черная глянцевая	0,98	[43]	ФБР-74Д на стальной подложке	0,68	[44]
черная матовая Minnesota 3M	0,99	[41]	Э-4100 на дуралюминиевой подложке	0,46	[44]
черная матовая Catalac Thermoflat	0,96	[44]	Э-4100 на медной подложке	0,41	[44]
Лак:			Э-4100 на стальной подложке	0,67	[44]
КО-815 на дуралюминиевой подложке	0,40	[44]	Эмаль белая фарфоровая	0,30	[41]
КО-815 на медной подложке	0,30	[44]			
КО-815 на стальной подложке	0,67	[44]			

Таблица 31.25. Коэффициент теплового излучения пигментов [45]

Погрешность измерения ±7

Цвет пигмента	Основа пигмента	ε_T при температуре, К	
		117	293
Белый	Al_2O_3	0,94	0,95
Белый	CaO	0,94	0,94
Белый	$MgCO_3$	0,91	0,95
Белый	MgO	0,91	0,94
Белый	$PbCO_3$	0,93	0,90
Белый	ThO_2	0,90	0,90
Белый	Y_2O_3	0,90	0,89

Продолжение табл. 31.25

Цвет пигмента	Основа пигмента	ε_T при температуре, К	
		117	293
Белый	ZnO	0,95	0,95
Белый	ZrO_2	0,95	0,95
Желтый	PbO	0,90	0,80
Желтый	$PbCrO_4$	0,93	0,96
Зеленый	Cr_2O_3	0,92	0,93
Красный	Fe_2O_3	0,91	0,94
Синий	Co_2O_3	0,94	0,90
Черный	CuO	0,96	—

31.6. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Таблица 31.26. Спектральный коэффициент теплового излучения легких металлов [46]

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 10%

Металл	T, К	ε_λ^n при λ, мкм						
		2	3	4	6	8	10	12
Алюминий	400	0,050	0,041	0,035	0,028	0,025	0,021	0,019
	500	0,054	0,045	0,038	0,032	0,027	0,024	0,021
	600	0,060	0,050	0,044	0,035	0,030	0,026	0,024
	700	0,065	0,055	0,047	0,038	0,033	0,029	0,025
	800	0,070	0,057	0,049	0,042	0,036	0,032	0,029
	900	0,074	0,061	0,053	0,043	0,038	0,034	0,031
Магний	400	0,063	0,052	0,044	0,036	0,031	0,027	0,024
	500	0,071	0,058	0,050	0,040	0,035	0,030	0,028
	600	0,085	0,066	0,056	0,045	0,038	0,034	0,032
	700	—	0,070	0,060	0,048	0,042	0,037	0,035
	800	—	0,076	0,065	0,053	0,045	0,040	0,037
	900	—	0,080	0,069	0,056	0,048	0,043	0,040

Таблица 31.27. **Коэффициент теплового излучения алюминия [20]**

Образцы полированные. Погрешность измерения ± 10%

T, К	ε_T	T, К	ε_T	T, К	ε_T	T, К	ε_T
50	0,0080	90	0,010	200	0,018	500	0,039
60	0,0085	100	0,011	250	0,021	600	0,046
70	0,0090	120	0,012	300	0,025	700	0,054 [19]
80	0,0095	150	0,013	400	0,032	800	0,062 [19]

Таблица 31.28. **Спектральный коэффициент отражения пленок алюминия при температуре от 291 до 295 К [20]**

Пленки получены испарением при давлении $1{,}33 \cdot 10^{-3}$ Па на стеклянные подложки. Угол падения потока излучения 0°. Погрешность измерения ± 2%

λ, нм	ρ_λ	λ, нм	ρ_λ	λ, нм	ρ_λ
300	0,80	650	0,82	1100	0,93
400	0,93	700	0,85	1200	0,90
500	0,93	800	0,82	3000	0,91
600	0,90	900	0,84	4000	0,92
		1000	0,90		

Таблица 31.29 **Спектральный коэффициент теплового излучения тугоплавких металлов [18]**

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 10%

Металл	T, К	ε_λ^n при λ, мкм											
		0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Ванадий [20]	300	—	—	—	—	—	—	—	—	0,16	0,12	0,090	0,080
Вольфрам	1200	0,486	0,482	0,474	0,461	0,446	0,428	0,408	0,386	0,186	0,112	0,086	0,078
	1600	0,480	0,479	0,466	0,451	0,436	0,418	0,399	0,378	0,204	0,134	0,108	0,098
	2000	0,474	0,470	0,459	0,441	0,426	0,408	0,390	0,371	0,222	0,157	0,130	0,117
	2600	0,465	0,461	0,447	0,426	0,411	0,394	0,376	0,360	0,248	0,191	0,163	0,146
Молибден	1000	—	0,458	0,438	0,417	0,394	0,367	0,333	0,302	0,106	0,063	0,046	0,035
	1200	—	0,448	0,429	0,410	0,389	0,363	0,333	0,306	0,130	0,081	0,061	0,049
	1600	—	0,432	0,415	0,397	0,378	0,358	0,333	0,312	0,165	0,108	0,068	0,084
	2000	—	0,419	0,403	0,387	0,370	0,352	0,333	0,317	0,191	0,133	0,084	0,068
Ниобий	1600	—	—	—	—	—	—	—	—	0,175	0,151	0,126	0,110
	1800	—	—	—	—	—	—	—	—	0,190	0,170	0,145	0,125
	2000	—	—	—	—	—	—	—	—	0,205	0,177	0,155	0,135
Рений	1810	—	—	—	—	—	—	—	0,360	0,260	—	—	—
	2388	—	—	—	—	—	—	—	0,362	0,275	—	—	—
	3045	—	—	—	—	—	—	—	0,365	0,285	—	—	—
Тантал	1200	—	0,525	0,510	0,473	0,421	0,363	0,304	0,262	0,148	0,123	0,108	—
	1600	—	0,516	0,495	0,458	0,412	0,361	0,316	0,281	0,172	0,145	0,128	—
	2000	—	0,507	0,480	0,444	0,405	0,362	0,327	0,299	0,196	0,167	0,148	—
	2400	—	0,498	0,464	0,432	0,399	0,366	0,338	0,317	0,220	0,190	0,168	—
Титан [24]	300	—	—	—	—	—	—	—	—	0,35	0,29	0,23	0,18
Хром [24]	293	0,47	0,40	0,40	0,40	0,43	0,41	0,40	0,40	0,24	0,20	0,21	0,17

Таблица 31.30. **Коэффициент теплового излучения ε_T тугоплавких металлов**

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 10%

T, К	V [19]	W [47]	Hf [19]	Mo [18]	Nb [18]	Re [18]	Ta [18]	Ti [19]	Cr [19]	Zr [19]
1000	0,145	0,105	—	—	0,116	0,164	0,132	0,227	0,353	—
1100	0,161	0,128	—	0,105	0,127	0,173	0,141	0,239	0,360	0,204
1200	0,176	0,133	0,284	0,117	0,138	0,181	0,149	0,251	0,372	0,214
1400	0,201	0,164	0,294	0,142	0,158	0,201	0,168	0,274	—	0,232
1600	0,222	0,195	0,304	0,166	0,178	0,225	0,186	0,297	—	0,248

T, К	V [19]	W [47]	Hf [19]	Mo [18]	Nb [18]	Re [18]	Ta [18]	Ti [19]	Cr [19]	Zr [19]
1800	0,241	0,223	0,314	0,192	0,195	0,245	0,205	0,316	—	0,261
2000	0,257	0,249	0,324	0,214	0,212	0,264	0,224	—	—	0,272
2200	—	0,269	—	0,234	0,228	0,282	0,242	—	—	—
2400	—	0,287	—	0,254	0,244	0,296	0,259	—	—	—
2600	—	0,302	—	0,269	—	0,309	0,274	—	—	—
2800	—	0,314	—	0,282	—	0,318	0,288	—	—	—
3000	—	0,325	—	—	—	—	0,300	—	—	—
3400	—	0,345	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 31.31. **Спектральный коэффициент теплового излучения цветных металлов и их сплавов [46]**
Образцы нихрома зачищенные; образцы других материалов полированные. Погрешность измерения ± 10%

Материал	T, К	ε_λ^n при λ, мкм						
		2	3	4	6	8	10	12
Бронза	273	0,057	0,049	0,043	0,035	0,031	0,029	0,027
	293	0,059	0,051	0,045	0,037	0,033	0,031	0,029
	400	0,070	0,057	0,050	0,041	0,035	0,032	0,029
	600	0,086	0,070	0,062	0,052	0,045	0,040	0,037
	800	0,099	0,082	0,073	0,058	0,051	0,047	0,042
	1000	0,11	0,092	0,080	0,065	0,056	0,052	0,049
	1400	0,13	0,11	0,093	0,078	0,067	0,060	0,056
Кобальт	400	0,074	0,063	0,055	0,044	0,037	0,033	0,030
	500	0,085	0,072	0,062	0,052	0,044	0,039	0,036
	600	0,094	0,080	0,070	0,057	0,050	0,045	0,040
	800	0,11	0,094	0,082	0,067	0,057	0,053	0,048
	1000	0,13	0,11	0,093	0,076	0,066	0,059	0,055
	1400	0,15	0,13	0,11	0,090	0,078	0,071	0,065
	1800	0,17	0,14	0,13	0,10	0,090	0,080	0,074
Константан [20]	293	0,16	0,14	0,12	0,098	0,085	0,076	0,070
Манганин [20]	293	0,16	0,13	0,11	0,093	0,080	0,072	0,065
Медь	400	0,040	0,033	0,027	0,022	0,019	0,017	0,015
	500	0,044	0,037	0,032	0,025	0,022	0,019	0,017
	600	0,048	0,040	0,035	0,028	0,024	0,021	0,019
	800	0,057	0,047	0,040	0,034	0,029	0,025	0,023
	1000	0,064	0,053	0,046	0,037	0,033	0,029	0,027
	1200	0,070	0,059	0,050	0,041	0,035	0,032	0,029
Никель	400	0,083	0,069	0,060	0,048	0,042	0,038	0,034
	500	0,095	0,079	0,069	0,056	0,048	0,043	0,040
	600	0,11	0,088	0,077	0,063	0,054	0,048	0,044
	800	0,12	0,10	0,090	0,074	0,065	0,057	0,053
	1000	0,14	0,12	0,10	0,084	0,073	0,066	0,060
	1400	0,17	0,14	0,12	0,10	0,088	0,078	0,073
	1600	0,18	0,15	0,13	0,11	0,094	0,084	0,077
Нихром	400	0,23	0,19	0,17	0,14	0,12	0,11	0,10
	600	0,24	0,20	0,18	0,14	0,13	0,11	0,10
	800	0,25	0,21	0,18	0,15	0,13	0,12	0,11
	1200	0,26	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13	0,12
	1600	0,27	0,23	0,20	0,17	0,15	0,13	0,12

Таблица 31.32. **Спектральный коэффициент отражения меди и никеля при температуре 291—295 К [28]**

Образцы полированные. Угол падения потока излучения 0°. Погрешность измерения ±5%

λ, нм	ρ_λ		λ, нм	ρ_λ	
	Cu	Ni		Cu	Ni
300	0,250	0,440	1000	0,901	0,725
500	0,440	0,612	1100	0,903	0,730
589	0,705	—	1200	0,905	0,740
600	0,720	0,650	2000	0,955	0,835
700	0,830	0,695	3000	—	0,884
800	0,890	0,705	4000	0,973	0,918
900	0,890	0,710	5000	0,968	0,940
			10 000	—	0,955

Таблица 31.33. **Коэффициент теплового излучения кобальта, меди и никеля [19]**

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 7%

T, К	^{s}T			T, К	$^{\varepsilon}T$		
	Co	Cu	Ni		Co	Cu	Ni
200	—	0,023	—	900	0,157	0,054	0,132
300	—	0,024	0,068	1000	0,175	0,058	0,144
400	—	0,027	0,078	1100	0,205	0,061	0,156
500	—	0,031	0,088	1200	0,225	—	0,168
600	—	0,036	0,099	1300	—	—	0,179
700	0,125	0,043	0,110	1400	—	—	0,188
800	0,148	0,050	0,120	1500	—	—	0,196

Таблица 31.34. **Спектральный коэффициент теплового излучения благородных металлов [46]**

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 10%

Металл	T, К	ε_λ^n при λ, мкм						
		2	3	4	6	8	10	12
Золото	400	0,046	0,037	0,032	0,027	0,023	0,020	0,018
	600	0,056	0,047	0,040	0,032	0,027	0,025	0,022
	800	0,065	0,054	0,046	0,038	0,033	0,029	0,027
	1000	0,073	0,060	0,052	0,042	0,036	0,033	0,030
	1200	0,078	0,066	0,057	0,047	0,040	0,036	0,033
Иридий	400	0,072	0,060	0,052	0,042	0,037	0,033	0,030
	600	0,088	0,075	0,065	0,053	0,045	0,041	0,037
	800	0,10	0,085	0,074	0,060	0,052	0,047	0,043
	1000	0,11	0,094	0,082	0,067	0,058	0,053	0,048
	1200	0,12	0,10	0,089	0,074	0,064	0,057	0,053
	1600	0,14	0,12	0,10	0,085	0,074	0,066	0,061
	2000	0,16	0,13	0,11	0,095	0,082	0,074	0,067
	2400	0,17	0,14	0,12	0,10	0,090	0,081	0,075
	2800	—	0,15	0,14	0,11	0,096	0,087	0,080
Палладий	400	0,095	0,078	0,069	0,057	0,048	0,042	0,039
	600	0,11	0,095	0,083	0,072	0,060	0,052	0,050
	800	0,13	0,11	0,095	0,082	0,069	0,062	0,057
	1000	0,15	0,12	0,11	0,095	0,077	0,068	0,063
	1400	0,17	0,14	0,12	0,11	0,090	0,080	0,075
	1800	—	0,16	0,14	0,12	0,10	0,091	0,085
	2200	—	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10	0,093
Платина	400	0,091	0,075	0,067	0,055	0,049	0,042	0,039
	600	0,11	0,093	0,081	0,068	0,059	0,053	0,047
	800	0,13	0,11	0,093	0,077	0,069	0,061	0,057
	1000	0,15	0,12	0,11	0,086	0,075	0,070	0,063
	1400	0,17	0,14	0,12	0,10	0,088	0,079	0,071
	1800	—	0,16	0,14	0,11	0,10	0,090	0,081
	2000	—	0,17	0,15	0,12	0,11	0,095	0,087
Родий [20]	293	0,10	0,080	0,060	0,042	0,040	0,040	0,040
Серебро [20]	293	0,025	0,020	0,020	0,020	0,020	0,015	0,013

Таблица 31.35. **Коэффициент теплового излучения ε_T благородных металлов [18]**

Образцы полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 7%

T, K	Au	Ir [18]	Pd	Pt	Rh	Ag
200	0,020	—	—	—	—	0,016
300	0,025	0,040	0,030	0,032	0,019	0,019
400	0,029	—	—	—	—	0,022
600	0,038	—	—	—	—	0,029
800	0,047	—	—	—	—	0,036
1000	0,056	0,210	0,100	0,128	0,084	0,043
1200	0,065	0,215	0,135	0,149	0,112	—
1400	—	0,216	0,162	0,167	0,133	—
1600	—	0,218	0,179	0,183	0,150	—
1800	—	0,220	—	0,196	0,163	—
2000	—	0,228	—	—	0,178	—
2200	—	0,230	—	—	0,183	—

Таблица 31.36. **Спектральный коэффициент пропускания и отражения пленок золота различной толщины при температуре от 291 до 295 K [48]**

Пленки получены испарением при давлении $1{,}33 \cdot 10^{-3}$ Па на кварцевые полированные подложки. Погрешность измерения ± 2%. Угол падения потока излучения 0°

Толщина пленки, нм	τ_λ при λ, нм											
	253,6	275,3	296,7	334,1	361,0	404,6	435,8	480,0	508,5	546,1	578,0	643,8
5	0,590	0,583	0,596	0,619	0,635	0,652	0,667	0,690	0,689	0,660	0,618	0,542
10	0,444	0,427	0,438	0,468	0,485	0,506	0,533	0,589	0,616	0,597	0,558	0,454
20	0,238	0,230	0,265	0,274	0,295	0,320	0,349	0,424	0,464	0,433	0,378	0,290
30	0,128	0,121	0,130	0,163	0,180	0,201	0,226	0,293	0,317	0,270	0,226	0,153
40	0,066	0,066	0,072	0,097	0,112	0,130	0,152	0,207	0,220	0,170	0,133	0,084
50	0,033	0,033	0,039	0,057	0,072	0,086	0,104	0,151	0,155	0,111	0,082	0,049
60	0,019	0,019	0,023	0,036	0,046	0,057	0,072	0,107	0,109	0,072	0,053	0,031
70	0,010	0,012	0,014	0,024	0,033	0,042	0,053	0,079	0,081	0,051	0,035	0,022
85	0,010	0,012	0,011	0,018	0,025	0,033	0,041	0,065	0,064	0,037	0,026	0,015
95	0,010	0,010	0,010	0,015	0,021	0,027	0,034	0,054	0,053	0,031	0,021	0,012

Продолжение табл. 31.36

Толщина пленки, нм	ρ_λ при λ, нм											
	253.6	275,3	296,7	334.1	361.0	404,6	435,8	480,0	508,5	546,1	578,0	643,8
5	0,130	0,135	0,133	0,126	0,129	0,122	0,117	0,109	0,108	0,120	0,139	0,172
10	0,207	0,210	0,207	0,195	0,190	0,181	0,167	0,145	0,145	0,172	0,205	0,273
20	0,272	0,303	0,301	0,289	0,285	0,278	0,259	0,223	0,231	0,300	0,366	0,478
30	0,300	0,323	0,330	0,329	0,335	0,333	0,321	0,286	0,315	0,418	0,493	0,593
40	0,269	0,301	0,316	0,322	0,342	0,352	0,345	0,324	0,369	0,489	0,567	0,660
50	0,253	0,279	0,274	0,294	0,331	0,349	0,346	0,338	0,402	0,530	0,605	0,683
60	0,232	0,259	0,265	0,276	0,320	0,339	0,339	0,338	0,414	0,550	0,622	0,674
70	0,223	0,255	0,261	0,264	0,306	0,320	0,328	0,333	0,422	0,557	0,623	0,675
85	0,218	0,248	0,250	0,253	0,294	0,315	0,322	0,332	0,426	0,569	0,627	0,668
95	0,212	0,248	0,249	0,243	0,256	0,302	0,308	0,327	0,431	0,580	0,629	0,679

Таблица 31.37. **Спектральный коэффициент отражения пленок серебра при температуре от 291 до 295 K [20]**

Пленки получены испарением при давлении $1{,}33 \cdot 10^{-3}$ Па на кварцевые полированные подложки. Угол падения потока излучения 0°. Погрешность измерения ± 2%

λ, нм	ρ_λ	λ, нм	ρ_λ	λ, нм	ρ_λ
251	0,340	338	0,555	500	0,913
288	0,212	357	0,744	589	0,950
305	0,091	385	0,814	700	0,960
316	0,042	420	0,866	1000	0,970
326	0,146	450	0,905	1100	0,975

Таблица 31.38. **Спектральный коэффициент отражения пленок палладия и родня при температуре от 291 до 295 K [20]**

Пленки получены испарением при давлении $1{,}33 \cdot 10^{-3}$ Па на стеклянные подложки. Угол падения потока излучения 0°. Погрешность измерения ± 2%

λ, нм	ρ_λ		λ, нм	ρ_λ	
	Pd	Rh		Pd	Rh
200	0,25	—	800	0,70	0,82
300	0,43	0,67	900	0,70	0,83
400	0,55	0,75	1000	0,70	0,84
500	0,63	0,78	1100	0,71	0,85
600	0,67	0,80	1200	0,72	0,85
700	0,68	0,81	2000	—	0,91

Таблица 31.39. Спектральный коэффициент теплового излучения легкоплавких металлов [46]

Ртуть — очищенная. Образцы других металлов — полированные, неокисленные. Погрешность измерения ± 10%

Металл	T, К	ε_λ^n при λ, мкм						
		2	3	4	6	8	10	12
Олово	293	0,083	0,068	0,059	0,049	0,040	0,036	0,031
	400	0,098	0,080	0,070	0,057	0,050	0,045	0,041
	500	—	0,090	0,080	0,065	0,057	0,050	0,047
Ртуть	273—293	—	0,17	0,16	0,13	0,11	0,10	0,090
Свинец	293	0,11	0,090	0,080	0,065	0,057	0,051	0,048
	400	0,13	0,11	0,093	0,078	0,067	0,061	0,007
	600	0,16	0,13	0,12	0,096	0,084	0,077	0,069
Сурьма	293	0,095	0,079	0,069	0,055	0,047	0,041	0,039
	400	0,11	0,090	0,080	0,066	0,057	0,050	0,046
	500	0,12	0,10	0,088	0,073	0,062	0,055	0,050
	600	0,13	0,11	0,095	0,078	0,070	0,060	0,055
	700	0,14	0,12	0,10	0,084	0,075	0,066	0,060
	800	0,15	0,12	0,11	0,089	0,078	0,072	0,065
	900	0,16	0,13	0,11	0,095	0,084	0,076	0,070
Цинк [24]	293	0,051	0,045	0,043	0,039	0,039	0,038	0,037
	500	0,061	0,053	0,050	0,043	0,043	0,043	0,042
	700	0,072	0,060	0,055	0,049	0,047	0,046	0,045

Таблица 31.40. Коэффициент теплового излучения черных металлов

Погрешность измерения ± 10%

Материал	Состояние излучающей поверхности	T, К	ε_T^n
Железо [19]	Полированная	200	0,081
		300	0,101
		500	0,139
		700	0,177
		900	0,216
		1100	0,254
Сталь:			
мягкая углеродистая [20]	Полированная	290	0,10
низкоуглеродистая [20]	»	300	0,10
20Х23Н18 [19]	Окисленная	300	0,47
12Х18Н9Т [19]	Электрополированная	290—300	0,13
1Х18Н10Т	»	400	0,16
	»	800	0,26
	»	1200	0,37
	Полированная пастой ГОИ	293	0,19

Продолжение табл. 31.40

Материал	Состояние излучающей поверхности	T, К	ε_T^n
07Х16Н6	Шлифованная порошками М7-М40	293	0,26—0,31
	Полированная	300	0,15
	Окисленная	300	0,70
	»	900	0,85
	»	1100	0,87
08Х18Н12Б	Зеркально полированная	290	0,19
		300	0,20
Чугун [19]	Полированная	473	0,21
	Полированная, окисленная при 873 К	473	0,64
		873	0,78
	Шероховатая, окисленная при 1073 К	523	0,95

Таблица 31.41. Коэффициент теплового излучения и поглощения солнечного излучения терморегулирующих покрытий из чередующихся слоев металлов и диэлектриков [20]

Погрешность измерения ± 7%

Тип покрытия	Материал подложки	ε_T	α_S
CeO_2—Mo—CeO_2	Молибден	0,06	0,90
CeO_2—Mo—CeO_2	Слой алюминия на стекле	0,07	0,90
CeO_2—Mo—CeO_2	Сталь 12Х18Н10Т	0,18	0,85
Mo—CeO_2	Слой алюминия на стекле	0,06	0,90
Mo—SiO_2	То же	0,06	0,90
Ni—SiO_2—Ni—SiO_2	Стекло	0,10	0,92
SiO—Al—SiO	»	0,08	0,89
SiO_2—Mo—SiO_2	Молибден	0,08	0,85
SiO_2—Mo—SiO_2	Слой алюминия на стекле	0,08	0,85
SiO_2—Mo—SiO_2	Сталь 12Х18Н10Т	0,15	0,85
ZnS—Al—ZnS	Стекло	0,16	—
ZnS—Cu—ZnS	»	0,11	—
ZnS—Ni—ZnS		0,06	0,85

31.7. ГРАФИТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.42. **Спектральный коэффициент отражения ρ_λ и спектральные коэффициенты теплового излучения ε_λ графитов**

λ, мкм	Углеграфит*1 при T=291 К [49]	Электрографит*2 при T=1460 К [50]	Реакторный графит *3 при T = = 1860 К [50]
	ρ_λ	ε_λ^n	ε_λ^n
0,5	0,14	0,86	0,87
1,0	0,16	0,83	0,84
1,5	0,18	0,87	0,87
2,0	0,19	0,87	0,90
2,5	0,21	0,85	0,90
3,0	0,22	0,85	0,89
3,5	0,23	0,82	0,89
4,0	0,25	0,83	0,89
4,5	—	0,82	0,85
5,0	—	0,85	0,80

*1 Образцы компактные, обожженные. Погрешность измерения ± 5%.
*2 Образцы трубчатые. Поверхность неокисленная. Погрешность измерения ± 10%.
*3 Образцы трубчатые. Поверхность пористая, неокисленная: d = 1700 кг/м³ при T = 283 К. Погрешность измерения ± 10%.

Таблица 31.43. **Коэффициенты теплового излучения и спектральные коэффициенты теплового излучения графитов (λ = 0,65 ÷ 0,66 мкм)**

T, К	Углеграфит [49]	Графит РВ [51]	Графит ГМЗ [51]	Реакторный графит [50]		Электрографит [50]	
	ε_T *1	ε_T *2	ε_λ^n*2	ε_T *3	ε_λ^n*3	ε_T *4	ε_λ^n*4
400	0,74	—	—	—	—	—	—
600	0,76	—	—	—	—	—	—
800	0,76	—	—	—	—	—	—
1000	0,77	—	—	0,87	0,91	0,86	0,84
1200	0,77	0,76	0,89	0,86	0,90	0,84	0,82
1400	0,78	0,78	0,89	0,86	0,88	0,82	0,80
1600	0,78	0,79	0,89	0,86	0,86	0,80	0,79
1800	0,78	0,80	0,88	0,86	0,85	0,78	0,77
2000	0,78	0,82	0,88	0,86	0,84	0,76	0,76
2200	0,78	—	0,88	0,86	0,83	—	—
2400	0,78	—	0,87	0,86	0,81	—	—
2600	—	—	0,88	0,85	0,80	—	—
2800	—	—	—	0,84	0,79	—	—

*1 Образцы компактные, обожженные. Погрешность измерения ± 10%.
*2 Образцы цилиндрические; поверхность полированная, неокисленная. Погрешность измерения ± 6—10%.
*3 Образцы трубчатые. Поверхность пористая, неокисленная; d = 1700 кг/м³ при 293 К. Погрешность измерения ± 10—12%.
*4 Образцы трубчатые. Поверхность неокисленная. Погрешность измерения ± 10%.

Таблица 31.44. **Спектральный коэффициент отражения пиролитического графита при температуре 293 К [49]**

λ, нм	ρ_λ при высоте неровностей на отражающей поверхности, мкм			
	5—7,5	0,75—1,75	1—1,5	0,1
400	0,190	0,145	0,089	0,075
665	0,210	0,160	0,092	0,080
700	0,215	0,165	0,093	0,082

Таблица 31.45. **Спектральный коэффициент ε_λ^n теплового излучения углепластика и стеклоуглерода при температуре от 291 до 293 К [52]**

Погрешность измерения ± 8%

λ, мкм	Углепластик КУПВМ, шероховатый	Стеклоуглерод СУ-2500, полированный
0,63	0,92	0,81
1,15	0,79	0,73
3,39	0,72	0,66
10,6	0,79	0,50

Таблица 31.46. **Коэффициент теплового излучения ε_T различных видов сажи [20]**

Погрешность измерения ± 10%

T, К	Вид сажи					
	Ацетиленовая	Камфорная	Камфорная с жидким стеклом	Ламповая	Скипидарная	Угольная
90	—	0,930	0,960	—	—	—
100	—	0,925	0,958	—	—	—
120	0,790	0,920	0,955	—	—	0,760
140	0,785	—	0,955	—	—	0,805
160	0,777	—	0,954	—	—	0,820
180	0,768	—	0,953	—	—	0,835
200	0,765	—	0,953	—	0,950	0,845
220	0,764	—	0,952	—	0,950	0,865
240	0,763	—	0,951	—	0,951	0,902
260	0,762	—	0,951	0,942	0,951	0,920
280	0,761	—	0,950	0,944	0,952	0,940
300	0,760	—	0,950	0,948	0,952	0,960

31.8. ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.47. **Оптические характеристики органических стекол [30]**

Характеристика	Метилметакрилат	Полистирол	Полихлорстирол
n для λ, нм:			
404,7	1,5049	1,6271	1,6507
486,1	1,49628	1,60574	1,62833
589,3	1,49029	1,59194	1,61400
656,3	1,4878	1,58655	1,60838
1000	1,4815	1,5738	1,5957
β, 10^{-5} 1/К, для λ=589,3 нм	—16	—	—11

Таблица 31.48. **Спектральный коэффициент внутреннего пропускания $\tau^*_{\lambda 1}$ полимерных материалов толщиной 1 мм при температуре 293 К [20]**

Образцы — полированные диски. Погрешность измерений ± 10%

λ, мкм	Ацетилцеллюлоза	Ацетобутиратцеллюлоза белая	Полиамид ПК-4	Поликарбонат [53]	Полиметилметакрилат	Политрифторхлорэтилен	Полиэтилентерефталат ПЭТФ	Тефлон	Этилцеллюлоза
0,40	0,0081—0,041	0,0185	0,208	0,563	—	—	0,0345	—	0,0081—0,041
0,50	0,0081—0,041	0,0206	0,208	0,723	—	0,843	0,0179	—	0,0081—0,041
0,60	0,0081—0,041	0,0206	0,208	0,723	—	—	0,0179	—	0,0081—0,041
0,70	0,0081—0,041	0,0206	0,249	0,706	—	—	0,0345	—	0,0081—0,041
0,80	—	—	—	0,672	—	—	—	—	—
1,0	—	—	—	—	0,364	0,936	—	—	—
1,5	—	—	—	—	0,364	0,940	—	—	—
2,0	—	—	—	—	0,364	0,947	—	0,0134	—
3,0	—	—	—	—	0,130	0,834	—	0,0625	—
4,0	—	—	—	—	0,218	0,464	—	0,0081	—
5,0	—	—	—	—	0,364	0,604	—	0,0625	—

Таблица 31.49. **Оптические характеристики пластифицированного и непластифицированного органического стекла [23]**

T, К	λ, мкм	Пластифицированное стекло марки СОЛ		Непластифицированное стекло марки СТ-1	
		n	$\tau^*_{\lambda 1}$	n	$\tau^*_{\lambda 1}$
291	0,300	—	0,11	—	—
291	0,320	—	0,53	—	—
291	0,340	—	0,76	—	0,11
291	0,360	—	0,86	—	0,85
291	0,380	—	0,88	—	0,89
291	0,400	—	0,89	—	0,90
294	0,589	1,492	0,89	1,489	0,85
318	0,589	1,488	0,90	1,486	0,84
333	0,589	1,486	0,90	1,484	0,84
291	0,750	—	0,92	—	0,80
291	0,800	—	0,90	—	0,92
291	1,00	—	0,90	—	0,92
291	1,20	—	0,61	—	0,90
291	1,40	—	0,60	—	0,60
291	1,60	—	0,70	—	0,69
291	2,00	—	0,47	—	0,45

Таблица 31.50. **Показатель преломления полимерных материалов при 291—293 К для длины волны 589,1 нм [55]**

Материал	n	Материал	n
Аминопласт	1,55—1,62	Стирол	1,61—1,67
Ацетилцеллюлоза	1,47—1,50	Фенолформальдегид	1,54—1,70
Винилацетат	1,473	Формальдегид крезольный кислый	1,57—1,65
Винилхлорид	1,52—1,53	Целлулоид	1,495—1,520
Метакрилат	1,50—1,52		
Метилметакрилат	1,49		
Полидихлорстирол	1,61		
Полистирол	1,59—1,61		

Таблица 31.51. **Спектральный коэффициент внутреннего пропускания τ^*_λ полимерных материалов, подвергаемых ультрафиолетовому облучению [20]**

Облучение имитирует воздействие заатмосферного солнечного излучения длительностью 100 ч. Образцы — полированные пластины толщиной 30 мкм. Измерения при температуре 293 К. Погрешность измерений ± 5%

λ, мкм	Поликарбонат		Полиэтилентерефталат	
	до облучения	после облучения	до облучения	после облучения
0,40	0,87	0,63	0,84	0,28
0,45	0,87	0,68	0,85	0,32
0,50	0,88	0,70	0,86	0,38
0,60	0,89	0,76	0,87	0,50
0,70	0,90	0,79	0,87	0,57
0,80	0,90	0,83	0,88	0,62
1,0	0,90	0,84	0,89	0,66

31.9 СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица 31.52. **Коэффициент поглощения солнечного излучения для строительных материалов [20]**

Измерения при температуре от 290 до 300 К. Погрешность измерений ± 10%

Материал	$^{\alpha}S$	Материал	$^{\alpha}S$
Алебастр	0,31	красками:	
Асбоцемент:		белой	0,35
серый	0,66	зеленой	0,59
белый	0,41	голубой	0,48
Асбошифер	0,75	темно-зеленой	0,74
Бетон:		покрашенный цементными красками:	
неокрашенный	0,55	голубой	0,67
покрашенный силикатными		розовой	0,56

Материал	$^{\alpha}S$	Материал	$^{\alpha}S$	Материал	$^{\alpha}S$	Материал	$^{\alpha}S$
светло-зеленой	0,66	Кирпич:		Фарфор	0,52	клеевая	0,40
темно-зеленой	0,68	белый	0,33	Фибролит цементный	0,79	розовая	0,52
Гипс неполированный	0,25	красный	0,48	Черепица:		светло-голубая	0,53
Древесноволокнистая плита бесцветная, без отделки	0,68	Мипора чистая белая	0,16	коричневая	0,74	Штукатурка:	
		Мрамор:		красная	0,67	светло-желтая	0,48
		белый	0,42	Штукатурка:		силикатная	0,78
		темный	0,68	известковая	0,50	темно-серая	0,75
Древесностружечная плита экструкционная	0,43	Рубероид	0,93	известковая белая	0,30	цементная состава:	
		Стекловолокно	0,56			1 : 3	0,66
		Стеклоткань	0,42			1 : 5	0,64

Таблица 31.53. **Спектральный коэффициент отражения строительных материалов при температуре 293 К [20]**

Погрешность измерений ± 10%

Материал	ρ_λ для λ, мкм										
	0,50	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
Бетон:											
неокрашенный	0,37	0,43	0,42	0,30	0,05	0,06	0,07	0,07	0,32	0,16	0,19
окрашенный цементной голубой краской	0,36	0,41	0,51	—	—	—	—	—	—	—	—
окрашенный цементной зеленой краской	0,26	0,28	0,43	—	—	—	—	—	—	—	—
Древесноволокнистые плиты:											
напрессованные поливинилхлоридной пленкой	0,08	0,11	0,25	—	—	—	—	—	—	—	—
окрашенные белой эмалью	0,71	0,72	0,75	—							
Песок сухой очищенный	—	—	0,40	0,50	0,54	—	—	—	—	—	—
Фарфор:											
глазурованный	0,43	—	0,30	0,25	0,16	0,15	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05
неглазурованный	0,53	—	0,38	0,33	0,20	0,24	0,08	0,08	0,05	0,10	0,30
Шамот белый	0,92	—	0,95	0,90	0,40	0,62	0,25	0,12	0,08	0,16	0,42
Штукатурка гипсовая	0,82	0,85	0,84	0,52	0,08	0,37	0,25	0,12	0,17	0,08	0,06

Таблица 31.54. **Коэффициент теплового излучения строительных материалов [55]**

Материал	T, К	ε_T^n	Материал	T, К	ε_T^n
Асбест	293	0,96	Мрамор серый полированный	293	0,932
Асбошифер	293	0,96	Рубероид	293	0,93
Асфальт	298—303	0,95	Стекло оконное:		
Бетон	293	0,92	гладкое	298—303	0,91
Гипс неполированный	293	0,903	матовое	293	0,96
Глина обожженная	303	0,91	Толь кровельный	293	0,91—0,93
Дерево строганое	293	0,8—0,9	Цемент	300	0,54
Древесные опилки (хвойные)	298—303	0,96	Штукатурка шероховатая известковая	283—363	0,91
Кирпич:					
красный неполированный	293	0,932			
огнеупорный	773—1273	0,65—0,75			
шамотный	293	0,85			
	1273	0,75			
	1503	0,59			

31.10. ОКСИДЫ, БОРИДЫ, КАРБИДЫ И НИТРИДЫ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Таблица 31.55. **Коэффициент теплового излучения ε_T тугоплавких оксидов [51]**

Погрешность измерений ± 10%

T, К	Al_2O_3	MgO	ZrO_2
1200	0,35	0,33	—
1300	0,36	0,28	0,39
1400	0,37	0,28	0,42
1500	0,38	0,30	0,45
1600	0,39	0,34	0,47
1700	0,40	0,38	0,48
1800	—	0,43	0,49

Продолжение табл. 31.55

Таблица 31.56. **Коэффициент теплового излучения боридов, карбидов и нитридов тугоплавких и редкоземельных металлов [18]**

Погрешность измерений ± 10%

Материал	α_T при температуре, К									
	1100	1300	1500	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900
Борид:										
гадолиния	0,61	0,62	0,62	0,63	0,64	—	—	—	—	—
гафния	0,85	0,87	0,89	0,92	0,94	—	—	—	—	—
иттрия	0,63	0,65	0,66	0,67	0,68	—	—	—	—	—
лантана	0,68	0,69	0,69	0,70	0,71	—	—	—	—	—
неодима	0,56	0,56	0,58	0,58	0,59	—	—	—	—	—
самария	0,71	0,70	0,69	0,68	0,67	—	—	—	—	—
циркония	0,86	0,88	0,91	0,91	0,95	—	—	—	—	—
Карбид:										
бора	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	—	—	—	—	—
вольфрама	—	—	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	—
ниобия	0,41	0,42	0,43	0,45	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48
тантала	—	—	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	—
титана	0,85	0,86	0,87	0,87	0,89	—	—	—	—	—
циркония	—	0,81	0,79	0,77	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64
Нитрид бора	0,58	0,59	0,60	0,60	0,60	—	—	—	—	—

Таблица 31.57. **Спектральный коэффициент теплового излучения оксидов металлов и сплавов для длины волны 0,65 мкм [56]**

Образцы — диски с гладкой окисленной поверхностью. Погрешность измерений 10—15%

Окисленный материал	ε_λ^n	Окисленный материал	ε_λ^n
Алюмель	0,87	Сталь:	
Алюминий	0,30	нержавеющая	0,80
Бериллий	0,35	углеродистая	0,85
Ванадий	0,70	Титан	0,50
Железо	0,70	Торий	0,50
Иттрий	0,60	Уран	0,30
Кобальт	0,75	Хром	0,70
Константан	0,84	Хромель:	
Магний	0,20	90 Ni — 10 Cr	0,87
Медь	0,70	80 Ni — 20 Cr	0,90
Никель	0,90	60 Ni — 24 Fe — 16Cr	0,83
Ниобий	0,70	Цирконий	0,40
		Чугун	0,70

31.11. ЗЕМНЫЕ ПОКРОВЫ И ПРИРОДНЫЕ МИНЕРАЛЫ

Таблица 31.58. **Спектральный коэффициент отражения ρ_λ различных почв [19]**

λ, мкм	Глина жирная	Земля			Песок желтый
		желтая	коричневая	красная	
0,4	0,08	0,08	0,08	0,06	0,15
0,5	0,12	0,18	0,12	0,07	0,27
0,6	0,17	0,32	0,17	0,18	0,36
0,7	0,20	0,53	0,20	0,28	0,44
0,8	0,18	0,67	0,21	0,30	0,50
0,9	0,17	0,76	0,23	0,33	0,54
1,0	0,20	0,81	0,20	—	0,58

Примечание. Для суглинка сухого и чернозема сухого средние значения ρ_λ в диапазоне длин волн 0,4 — 0,7 мкм составляют 0,15 и 0,7 соответственно.

Таблица 31.59. **Спектральный коэффициент отражения ρ_λ различных видов растительности [19]**

λ, мкм	Листва			Солома	Трава	
	свежая зеленая	сухая желтая	сухая коричневая		свежая	сухая
0,4	0,10	0,04	0,04	0,10	0,04	0,10
0,5	0,21	0,08	0,08	0,20	0,08	0,18
0,6	0,32	0,22	0,15	0,27	0,19	0,27
0,7	0,40	0,37	0,23	0,33	0,20	0,30
0,8	0,49	0,43	0,38	0,38	0,50	0,35
0,9	0,55	0,48	0,52	0,44	0,69	0,40
1,0	0,58	0,50	0,60	0,48	0,76	0,43

Примечание. Для хвои среднее значение ρ_λ в диапазоне длин волн 0,7—1 мкм равно 0,30.

Таблица 31.60. **Показатель преломления природных драгоценных и полудрагоценных камней для длины волны 589,3 нм [54]**

Материал	n_o	n_e	n_1-n_2 [56]*1
Алмаз белый	2,417	—	0,044
Берилл	1,571—1,599	1,566—1,590	—
Изумруд	1,588—1,595	1,581—1,588	0,014
Сапфир:			
белый	1,768—1,771	1,759—1,761	—
зеленый	1,770—1,779	1,762—1,770	0,018
рубиновый	1,768—1,778	1,760—1,769	—
Турмалин	1,669	1,638	0,017
Хрусталь горный	1,544	1,553	0,013

Материал	n_p	n_m	n_G
Бирюза	—	1,62	1,65
Малахит	—	1,66	1,91
Топаз	1,630	1,631	1,638

*1 Приведены значения n_1 для $\lambda = 687{,}0$ мкм и n_2 для $\lambda = 430{,}8$ мкм.

Таблица 31.61. **Показатель преломления белого алмаза в видимой области спектра [54]**

λ, нм	n	λ, нм	n
400	2,465	600	2,416
450	2,446	650	2,411
500	2,433	700	2,407
550	2,423	750	2,404

31.12. ЛУННЫЕ ГРУНТЫ

Таблица 31.62. **Коэффициент теплового излучения лунного грунта из района Моря Изобилия [58]**

Образцы с насыпной плотностью 1900 кг/м³; поверхность насыпки сглажена. Погрешность измерений ± 1%

T, К	ε_T	T, К	ε_T
90	0,9764	200	0,9743
120	0,9763		
160	0,9758	240	0,9706
		270	0,9660
		300	0,9603

Таблица 31.63. **Спектральный коэффициент теплового излучения лунного грунта из района Моря Изобилия [58]**

Образцы с насыпной плотностью, кг/м³: I — 1400; II — 1600—1700; III — 1900; поверхность насыпки сглажена

λ, мкм	ε_λ^n			λ, мкм	ε_λ^n		
	I [58]	II	III		I [58]	II	III
2,5	0,82	0,78	0,73	10	0,97	0,97	0,97
4,0	0,77	0,75	0,72	12	0,97	0,97	0,97
6,0	0,98	0,86	0,84	14	0,98	0,98	0,98
8,0	0,97	0,97	0,97				

Таблица 31.64. **Спектральный коэффициент диффузного отражения ρ_λ реголита различных районов Луны при температуре от 293 до 300 К [60]**

Образцы в виде мелкозернистого порошка; поверхность насыпки сглажена. Материал из района: I — Океана Бурь с глубины 0,16 м; II — Океана Бурь с глубины 0,33 м; III — Моря Спокойствия с глубины 0,10—0,11 м; IV — Моря Изобилия с глубины до 0,08 м; V — Моря Спокойствия с глубины 0,015 м. Погрешность измерений ± 5%

λ, мкм	I	II	III	IV	V
0,30	0,080	0,085	0,075	0,088	0,069
0,50	0,110	0,112	0,095	0,100	0,080
0,70	0,132	0,138	0,112	0,117	0,100
0,90	0,148	0,151	0,131	0,124	0,106
1,2	0,145	0,145	0,117	0,124	0,102
1,5	0,164	0,160	0,140	0,130	0,120
1,8	—	—	—	0,155	—

Таблица 31.65. **Показатель преломления некоторых жидкостей при температуре от 293 до 298 К**

Жидкость	λ, нм	n	Литература
Альфамонобромнафталин	589,3	1,6588	[60]
Анилин	589,3	1,586	[62]
Ацетон	546,1	1,3576	[63]
»	632,8	1,3542	[63]
Бензилбензоат	589,3	1,568	[62]
Бензол	546,1	1,5030	[63]
»	589,3	1,5014	[64]
»	632,8	1,4950	[63]
Бромоформ	589,3	1,5980	[64]
Вода дистиллированная + + глицерин (1:1)	589,3	1,3981	[65]
н-Гексан	546,1	1,3742	[63]
»	632,8	1,3711	[63]
Глицерин	589,3	1,4370	[64]
Иодометилен	589,3	1,7559	[64]
Кислота:			
акриловая	589,3	1,4224	[30]
валериановая	589,3	1,4085	[66]
винилуксусная	589,3	1,4257	[66]
изовалериановая	589,3	1,4085	[66]
метилуксусная	589,3	1,4051	[66]
серная	589,3	1,4290	[66]
соляная	589,3	1,2540	[66]
уксусная	589,3	1,3720	[66]
Масло:			
анисовое	589,3	1,560	[58]
гвоздичное	589,3	1,538	[27]
касторовое	589,3	1,480	[56]
кедровое	589,3	1,515	[58]
коричное	589,3	1,602	[58]
льняное	589,3	1,485	[29]
маковое	589,3	1,463	[29]
оливковое	589,3	1,467	[58]
парафиновое	589,3	1,440	[27]
подсолнечное	589,3	1,470	[56]
прованское	589,3	1,460	[62]
сандаловое	589,3	1,508	[58]
терпентиновое	589,3	1,470	[27]
Метилацетат	589,3	1,450	[61]
Метилен иодистый	589,3	1,737	[61]
Метилсалицилат	589,3	1,538	[61]
Нитробензол	546,1	1,5579	[57]
»	589,3	1,55257	[51]
»	632,8	1,5458	[63]
Паральдегид	589,3	1,405	[62]
Парафин (жидкий)	589,3	1,480	[62]
Сероуглерод	546,1	1,6347	[63]
»	589,3	1,620	[58]
»	632,8	1,6185	[67]
Скипидар	589,3	1,470	[56]
Спирт:			
амиловый	589,3	1,4053	[66]
изопропиловый	546,1	1,3757	[63]
изопропиловый	632,8	1,3726	[63]
метиловый	546,1	1,3280	[63]
»	589,3	1,3265	[56]
»	632,8	1,3253	[63]
этиловый	546,1	1,3612	[63]
»	589,3	1,3611	[66]
»	632,8	1,3583	[63]
Толуол	546,1	1,4986	[63]
»	589,3	1,4980	[56]
»	632,8	1,4901	[63]

Продолжение табл. 31.65

Жидкость	λ, нм	n	Литература
Углерод четыреххлористый	546,1	1,4613	[63]
То же	589,3	1,4601	[58]
»	632,8	1,4547	[63]
Хинолин	589,3	1,627	[62]
Хлорбензол	589,3	1,525	[62]
Хлороформ	546,1	1,4477	[63]
»	589,3	1,4455	[66]
»	632,8	1,4435	[63]
Циклогексан	546,1	1,4260	[63]
»	632,8	1,4224	[63]
Эйтенол	589,3	1,540	[58]
Этил коричный	589,3	1,559	[62]
Этилсалицилат	589,3	1,523	[62]
Эфир диэтиловый	589,3	1,3526	[66]

Таблица 31.66. **Показатель преломления дистиллированной воды при 293 К [67]**

λ, нм	n	λ, нм	n
250,0	1,3773	3000	1,446
308,0	1,3569	3500	1,423
359,0	1,3480	3900	1,353
400,0	1,3433	4600	1,380
434,0	1,3403	5000	1,331
486,0	1,3371	6040	1,312
546,1	1,3341	7000	1,330
589,3	1,3330	8600	1,282
632,8	1,3314	10 000	1,212
768,0	1,3289	11 000	1,140
1000	1,3247	12 600	1,165
1250	1,3210	12 600	1,280
2000	1,290	13 500	1,330
2600	1,252	14 000	1,309

Таблица 31.67. **Спектральный показатель поглощения чистых природных вод [67]**

λ, нм	a_λ, м$^{-1}$	λ, нм	a_λ, м$^{-1}$
390	0,038	530	0,062
410	0,037	550	0,074
430	0,036	570	0,094
450	0,037	590	0,16
470	0,039	610	0,26
490	0,042	650	0,38
510	0,054	690	0,54

Таблица 31.68. **Спектральный показатель поглощения a_λ, $м^{-1}$, морской воды различных акваторий [67]**

Вода океанов взята из районов северных пассатных течений; вода Балтийского моря взята из района Рижского залива. Карибское море: a_λ ($\lambda = 430$ нм) $= 0{,}042$ $м^{-1}$. Саргассово море: a_λ ($\lambda = 490$ нм) $= 0{,}037$ $м^{-1}$. Средиземное море: a_λ ($\lambda = 490$ нм) $= 0{,}046$ $м^{-1}$. Черное море: a_λ ($\lambda = 490$ нм) $= 0{,}069$ $м^{-1}$

λ, нм	Атлантический океан	Тихий океан	Балтийское море
390	0,032	0,12	2,7
410	0,034	0,15	1,9
430	0,021	0,15	1,2
450	0,018	0,13	0,90
470	0,014	0,087	0,83
490	0,012	0,064	0,62
510	0,018	0,060	0,44
530	0,030	0,060	0,39
550	0,034	0,067	0,30
570	0,055	0,085	0,25
590	0,14	0,17	0,28
610	0,24	0,26	0,37
650	0,33	0,36	0,41
690	0,52	0,56	0,62

Таблица 31.69. **Показатель преломления оптических клеев и смол для $\lambda = 589{,}3$ нм при температуре 293 К**

Материал	n	Материал	n
Клей [68]:		УФ-235М жидкий	1,456
акриловый	1,4861	УФ-235М отвержденный	1,462
бальзам пихтовый	1,530	Смола [54]:	
		даммар	1,515
бальзаминовый	1,5191	казеин синтетический	1,550
ОК-50П	1,5801	копал	1,540
		шеллак оранжевый	1,516
ОК-60	1,5151		
ОК-72Ф	1,586	янтарь	1,539—1,545
ОК-90ПЛ	1,5411		

31.14. ГАЗЫ И ПЛАЗМА

Таблица 31.70. **Показатель преломления воздуха при давлении 10^5 Па и температуре 288 К [62]**

λ, нм	n	λ, нм	n
200	1,0003240	245	1,0003026
205	1,0003205	250	1,0003012
210	1,0003175	255	1,0002999
215	1,0003147	260	1,0002987
220	1,0003121	265	1,0002976
225	1,0003098	270	1,0002965
230	1,0003077	275	1,0002955
235	1,0003058	280	1,0002946
240	1,0003041	285	1,0002938

Продолжение табл. 31.70

λ, нм	n	λ, нм	n
290	1,0002930	600	1,0002769
295	1,0002922	650	1,0002763
300	1,0002915	700	1,0002757
310	1,0002901	750	1,0002753
320	1,0002889	800	1,0002750
330	1,0002878	850	1,0002747
340	1,0002868	900	1,0002745
350	1,0002860	950	1,0002743
360	1,0002852	1000	1,0002741
370	1,0002845	1200	1,0002737
380	1,0002839	1400	1,0002734
390	1,0002833	1600	1,0002732
400	1,0002827	1800	1,0002731
420	1,0002817	2000	1,0002730
440	1,0002809	2500	1,0002729
460	1,0002802	3000	1,0002728
480	1,0002795	5000	1,0002727
500	1,0002789	7000	1,0002726
520	1,0002784	10 000	1,0002726
540	1,0002780	20 000—	1,0002726
560	1,0002776	50 000	
580	1,0002772		

Таблица 31.71. **Коэффициент теплового излучения воздуха при различных температуре и давлении [69]**

Радиус полусферического слоя воздуха 0,1 м. Погрешность измерений ± 15%

T, К	ε_T при давлении, Па			
	10^4	10^5	10^6	$5 \cdot 10^6$
2000	$2{,}89 \cdot 10^{-5}$	$2{,}91 \cdot 10^{-4}$	$2{,}88 \cdot 10^{-3}$	$1{,}41 \cdot 10^{-2}$
3000	$1{,}58 \cdot 10^{-5}$	$2{,}12 \cdot 10^{-4}$	$2{,}74 \cdot 10^{-3}$	$1{,}66 \cdot 10^{-2}$
4000	$9{,}42 \cdot 10^{-6}$	$2{,}73 \cdot 10^{-4}$	$4{,}30 \cdot 10^{-3}$	$2{,}61 \cdot 10^{-2}$
5000	$1{,}86 \cdot 10^{-5}$	$5{,}93 \cdot 10^{-4}$	$1{,}07 \cdot 10^{-2}$	$5{,}04 \cdot 10^{-2}$
6000	$3{,}02 \cdot 10^{-5}$	$1{,}02 \cdot 10^{-3}$	$2{,}38 \cdot 10^{-2}$	$1{,}33 \cdot 10^{-1}$
7000	$4{,}06 \cdot 10^{-5}$	$1{,}18 \cdot 10^{-3}$	$3{,}51 \cdot 10^{-2}$	$1{,}99 \cdot 10^{-1}$
8000	$1{,}10 \cdot 10^{-4}$	$1{,}46 \cdot 10^{-3}$	$4{,}00 \cdot 10^{-2}$	$2{,}88 \cdot 10^{-1}$
9000	$4{,}14 \cdot 10^{-4}$	$3{,}16 \cdot 10^{-3}$	$5{,}22 \cdot 10^{-2}$	$3{,}52 \cdot 10^{-1}$
10 000	$1{,}19 \cdot 10^{-3}$	$7{,}29 \cdot 10^{-3}$	$6{,}89 \cdot 10^{-2}$	$4{,}05 \cdot 10^{-1}$
11 000	$2{,}64 \cdot 10^{-3}$	$1{,}39 \cdot 10^{-2}$	$9{,}53 \cdot 10^{-2}$	$4{,}68 \cdot 10^{-1}$
12 000	$4{,}39 \cdot 10^{-3}$	$2{,}63 \cdot 10^{-2}$	$1{,}40 \cdot 10^{-1}$	$5{,}09 \cdot 10^{-1}$
13 000	$5{,}51 \cdot 10^{-3}$	$4{,}02 \cdot 10^{-2}$	$1{,}63 \cdot 10^{-1}$	$4{,}75 \cdot 10^{-1}$
14 000	$5{,}42 \cdot 10^{-3}$	$5{,}25 \cdot 10^{-2}$	$2{,}18 \cdot 10^{-1}$	$6{,}58 \cdot 10^{-1}$
15 000	$4{,}52 \cdot 10^{-3}$	$6{,}17 \cdot 10^{-2}$	$2{,}64 \cdot 10^{-1}$	$7{,}34 \cdot 10^{-1}$
16 000	$3{,}58 \cdot 10^{-3}$	$6{,}82 \cdot 10^{-2}$	$3{,}14 \cdot 10^{-1}$	$8{,}54 \cdot 10^{-1}$
17 000	$2{,}76 \cdot 10^{-3}$	$7{,}04 \cdot 10^{-2}$	$3{,}49 \cdot 10^{-1}$	$8{,}23 \cdot 10^{-1}$
18 000	$2{,}24 \cdot 10^{-3}$	$6{,}85 \cdot 10^{-2}$	$3{,}62 \cdot 10^{-1}$	$8{,}56 \cdot 10^{-1}$
19 000	$1{,}79 \cdot 10^{-3}$	$6{,}27 \cdot 10^{-2}$	$3{,}65 \cdot 10^{-1}$	$8{,}27 \cdot 10^{-1}$
20 000	$1{,}53 \cdot 10^{-3}$	$5{,}37 \cdot 10^{-2}$	$3{,}65 \cdot 10^{-1}$	$8{,}63 \cdot 10^{-1}$

Таблица 31.72. **Коэффициент теплового излучения углекислого газа при различных температуре и давлении [69]**

Радиус полусферического слоя газа 0,1 м

T, К	ε_T при давлении, Па		
	10^3	10^4	10^5
2000	$4{,}5\cdot10^{-3}$	$3{,}6\cdot10^{-2}$	$8{,}8\cdot10^{-2}$
3000	$1{,}2\cdot10^{-4}$	$3{,}0\cdot10^{-3}$	$3{,}2\cdot10^{-2}$
4000	$2{,}2\cdot10^{-4}$	$2{,}1\cdot10^{-4}$	$3{,}0\cdot10^{-3}$
5000	$2{,}6\cdot10^{-5}$	$2{,}2\cdot10^{-4}$	$1{,}4\cdot10^{-3}$
6000	$6{,}1\cdot10^{-5}$	$8{,}3\cdot10^{-4}$	$3{,}1\cdot10^{-3}$

Таблица 31.73. **Показатели преломления некоторых газов при нормальных условиях [62]**

Погрешность измерений $\pm(5-7)\cdot10^{-8}$

Газ	λ, нм	n
Азот [63]	546,1	1,0002793
»	632,8	1,0002781
Аммиак	589,3	1,000375
Аргон [63]	546,1	1,0002630
»	632,8	1,0002618
Ацетилен	589,3	1,000606
Бром	589,3	1,001125
Бромистый водород	589,3	1,000570
Водород	589,3	1,000139
Водяной пар [63]	546,1	1,0002354
»	632,8	1,0002337
Гелий [70]	447,3	1,0002753
»	471,5	1,0002745
»	492,3	1,0002738
»	501,7	1,0002736
»	587,7	1,0002719
Дейтерий	589,3	1,000137
Закись азота	589,3	1,000515
Иодистый водород	589,3	1,000906
Кислород [63]	546,1	1,0002531
»	632,8	1,0002516
Криптон (естественный) [70]	450,4	1,0002752
»	556,4	1,0002724
»	565,1	1,0002722
»	587,3	1,0002719
»	605,8	1,0002716
»	645,8	1,0002711
Криптон (изотоп ^{86}Kr) [71]	556,4	1,0002724
»	587,3	1,0002717
»	608,5	1,0002716
»	760,4	1,0002700
»	851,1	1,0002695
»	877,9	1,0002694
»	893,1	1,0002693
»	975,4	1,0002690
Ксенон	589,3	1,000702
Метан	589,3	1,000441
Неон [72]	585,4	1,0002719
»	607,4	1,0002716
»	614,5	1,0002715
»	640,4	1,0002711
Озон [63]	589,3	1,000511
Оксид азота	589,3	1,000297
Оксид углерода [73]	589,3	1,000334

Продолжение табл. 31.73

Газ	λ, нм	n
Сернистый газ	589,3	1,000660
Серный ангидрид	589,3	1,000737
Сероводород	589,3	1,000619
Углекислый газ [63]	546,1	1,0004197
»	632,8	1,0004174
Фтор	589,3	1,000195
Фтористый метил	589,3	1,000449
Хлор	589,3	1,000768
Хлористый водород	589,3	1,000444
Хлористый метил	589,3	1,000865
Четыреххлористый теллур	589,3	1,002600
Шестифтористая сера	589,3	1,000783

Таблица 31.74. **Показатель преломления некоторых газов при температуре ожижения [74]**

Вещество	T, К	λ, мкм	n
Азот	78,0	0,589	1,205
Водород	20,4	0,589	1,0974
Гелий:			
He I	4,2	0,546	1,0206
He II	2,18	0,546	1,0269
Кислород	92.0	0,589	1,221

Таблица 31.75. **Спектральный коэффициент поглощения кислорода в ультрафиолетовой области спектра [69]**

Температура 3000 К, толщина слоя $5\cdot10^{-2}$ м

λ, мкм	α_λ	λ, мкм	α_λ
0,220	0,35	0,250	0,14
0,225	0,29	0,255	0,10
0,230	0,26	0,260	0,09
0,235	0,22	0,265	0,07
0,240	0,19	0,270	0,04
0,245	0,15	0,275	0,02

Таблица 31.76. **Коэффициент теплового излучения водородной плазмы [69]**

Радиус полусферического слоя плазмы 0,5 м.
Погрешность измерений ± 20%

T, К	ε_T при давлении, 10^6 Па						
	20	15	10	7	4	2	1
9000	0,46	0,37	0,27	0,20	0,11	0,05	0,03
10 000	0,73	0,65	0,51	0,40	0,26	0,15	0,09
11 000	—	0,85	0,75	0,66	0,50	0,31	0,20
12 000	—	—	0,92	0,85	0,70	0,51	0,38

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бришамбо Ш. П.** Солнечное излучение и радиационный обмен в атмосфере. М.: Мир, 1969.
2. **Новицкий Л. А.**//Теплофизика высоких температур. 1967. Т. 5, № 5. С. 919—923.
3. **Новицкий Л. А.**//Теплофизика высоких температур. 1968. Т. 6, № 3. С. 529—536.
4. **Новицкий Л. А., Вдовин В. Г., Федотов Г. И.**// Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1974. Вып. 6. С. 97—101.
5. **Новицкий Л. А., Трушицына А. В.**//Измерительная техника. 1970, № 7. С. 46—47.
6. **Новицкий Л. А., Трушицына А. В., Варакина Л. П.**//Приборы и системы управления. 1969, № 6. С. 30—32.
7. **Жевандров Н. Д.** Поляризация света. М.: Наука, 1969.
8. **Шерклифф У.** Поляризованный свет. М.: Мир, 1965.
9. **Оптико-электронные** приборы для научных исследований/Под ред. Л. А. Новицкого. М.: Машиностроение, 1986.
10. **Гуревич В. З.** Электрические инфракрасные излучатели. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963.
11. **Гуревич М. М.** Введение в фотометрию. Л.: Энергия, 1968.
12. **Новицкий Л. А., Степанов Б. М.** Фотометрия быстропротекающих процессов: Справочник. М.: Машиностроение, 1983.
13. **Лабораторные** оптические приборы/Под ред. Л. А. Новицкого. М.: Машиностроение, 1979.
14. **Измерение** температур в объектах новой техники/Под ред. А. Н. Гордова. М.: Мир, 1965.
15. **Кинджери В. А.** Измерения при высоких температурах. М.: Металлургиздат, 1963.
16. **Кизель В. А.** Отражение света. М.: Наука, 1973.
17. **Соколов А. В.** Оптические свойства металлов. М.: Физматгиз, 1961.
18. **Излучательные** свойства твердых материалов: Справочник/Под ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974.
19. **Криксунов Л. З.** Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978.
20. **Новицкий Л. А., Степанов Б. М.** Оптические свойства материалов при низких температурах: Справочник. М.: Машиностроение, 1980.
21. **Оптические** материалы для инфракрасной техники/Е. М. Воронкова, Б. Н. Гречушников, Г. И. Дистлер, И. П. Петров. М.: Наука, 1965.
22. **Справочник** по электротехническим материалам. Т. II//Под ред. Н. П. Богородицкого и В. В. Пасынкова. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1960.
23. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. М.: Атомиздат, 1968.
24. **Goldsmith A., Watermann T. E., Hirschhorn H. I.** Handbook of thermophysical properties of solid materials. Vol. I—IV. Oxford — London: Pergamon Press, 1963.
25. **Оптическое** стекло. Каталог СССР — ГДР. М.: Машприборинторг, 1979.
26. **Лагутин В. И., Лиханов В. П., Никонова Е. И.**// Оптико-механическая промышленность. 1984. № 5. С. 53—58.
27. **Материалы** в приборостроении и автоматике: Справочник/Под ред. Ю. М. Пятина. М.: Машиностроение, 1982.
28. **Ландсберг Г. М.** Оптика. М.: Наука, 1976.
29. **Справочник** конструктора оптико-механических приборов/Под ред. В. А. Панова. Л.: Машиностроение, 1980.
30. **Мальцев М. Д., Каракулина Г. А.** Прикладная оптика и оптические измерения. М.: Машиностроение, 1968.
31. **Мустель Е. Р., Парыгин В. Н.** Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.
32. **Байбородин Ю. В., Гаража С. А.** Электрооптический эффект в кристаллах и его применение в приборостроении. М.: Машиностроение, 1967.
33. **Круз П., Макглоулин Л., Макквистан Р.** Основы инфракрасной техники. М.: Воениздат, 1964.
34. **Гарбуни М.** Физика оптических явлений. М.: Энергия, 1967.
35. **Хадсон Р.** Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972.
36. **Хэкфорд Г. Л.** Инфракрасное излучение. М.—Л.: Энергия, 1964.
37. **Пейсахсон И. В.** Оптика спектральных приборов. М.: Машиностроение, 1970.
38. **Климков Ю. М.** Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами: М.: Советское радио, 1978.
39. **Смоля А. В., Тюрина С. Л.** Оптическая керамика на основе окиси иттрия//Оптико-физические измерения. М.: Издательство стандартов, 1977. С. 163—167.
40. **Рабинович Г. Д., Слободкин Л. С.** Терморадиационная и конвективная сушка лакокрасочных покрытий//Наука и техника, 1966.
41. **Дракин И. И.** Аэродинамический и лучистый нагрев в полете. М.: Оборонгиз, 1961.
42. **Новицкий Л. А.**//Теплофизика высоких температур. 1966. Т. 4, № 4. С. 621—631.
43. **Новицкий Л. А.**//Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7, № 5. С. 997—1007.
44. **Крошкин М. Г.** Физико-технические основы космических исследований. М.: Машиностроение, 1969.
45. **Леконт Ж.** Инфракрасное излучение. М.: Физматгиз, 1958.
46. **Брамсон М. А.** Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. М.: Наука, 1964.
47. **Гуторов М. М.** Основы светотехники и источники света. М.: Энергоатомиздат, 1983.
48. **Philip R.**/J. phys. et radium. 1959. Vol. 20. № 5. P. 535—540.
49. **Графит** как высокотемпературный материал/Под ред. К. П. Власова. М.: Мир, 1964.
50. **Теплообмен,** гидродинамика и теплофизические свойства веществ/Под ред. И. Т. Аладьева. М.: Наука, 1968.
51. **Петров В. А.** Излучательная способность высокотемпературных материалов. М.: Наука, 1969.
52. **Власов Л. В., Либерман А. А., Самойлов Л. Н.** Измерение коэффициентов излучения высокотемпературных материалов//Проблемы энергетической фотометрии. М.: Атомиздат, 1979.
53. **Мельников Ю. Ф.** Светотехнические материалы. М.: Высшая школа, 1976.
54. **Смит Г.** Драгоценные камни. М.: Мир, 1980.
55. **Блох А. Г.** Основы теплообмена излучением. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1962.
56. **Гаррисон Т. Р.** Радиационная пирометрия. М.: Мир. 1964.
57. **Корнилов Н. И., Солодова Ю. П.** Ювелирные камни. М.: Недра, 1983.
58. **Биркбэк Р. К.**//Тр. Американского о-ва инженеров-механиков. Сер. С. Теплопередача. 1972. Т. 94, № 3. С. 72—73./Пер. с англ. М.: Мир, 1973.
59. **Биркбэк Р. К.**//Приборы для научных исследований. 1972. № 7. С. 65—68.
60. **Лунный** грунт из Моря Изобилия/Под ред. А. П. Виноградова. М.: Наука, 1975.
61. **Бегунов Б. Н., Заказнов Н. П.** Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1973.
62. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
63. **Хауф В., Григуль У.** Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир, 1973.
64. **Кривовяз Л. М., Пуряев Д. Т., Знаменская М. А.**

Практика оптнческой измерительной лаборатории. М.: Машиностроение, 1974.

65. **Воронков Г. Л.** Ослабители оптического излучения. Л.: Машиностроение, 1980.

66. **Рабинович В. А., Хавин З. Я.** Краткий химический справочник. М.: Химия, 1977.

67. **Иванов А. П.** Физические основы гидрооптики. Минск: Наука и техника, 1975.

68. **Технология** оптических деталей/Под ред. М. Н. Семибратова. М.: Машиностроение, 1978.

69. **Радиационные** свойства газов при высоких температурах/В. А. Каменщиков, Ю. А. Пластинин, В. М. Николаев, Л. А. Новицкий. М.: Машиностроение, 1971.

70. **Martin W. C.**//JOSA. 1960. Vol. 50, № 2. P. 174—177.

71. **Littlefield T. A.**//Nature. 1950. Vol. 165. P. 187—189.

72. **Burns J., Adams G., Longwell F.**//JOSA. 1950. Vol. 40, № 5. P. 340—346.

73. **Енохович А. С.** Краткий справочник по физике. М.: Высшая школа, 1968.

74. **Справочник** по физико-техническим основам криогеники. — 3-е изд./Под ред. М. П. Малкова. М.—Л.: Энергоатомиздат, 1985.

Глава 32
СПЕКТРЫ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

А. А. Радциг

32.1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенные процессы излучения и поглощения света в среде атомных и молекулярных частиц обусловлены переходами между их электронными состояниями и могут быть подразделены на три типа: 1) свободно-свободные переходы (тормозное излучение и поглощение света при рассеянии электронов на атомах и ионах, сплошной спектр); 2) связанно-свободные переходы (фотононизация атомов и молекул и фоторекомбинация электронов на ионах и нейтральных частицах, сплошной спектр) и 3) связанно-связанные (дискретные) переходы (линейчатый спектр атомов и полосатый спектр молекул).

Мы подробно остановимся только на дискретных спектрах атомов и молекул в оптическом диапазоне длин волн, которые возникают при переходах электронов в пределах внешней (валентной) оболочки, а также связаны с изменениями колебательно-вращательных состояний молекулярных частиц. Соответственно будет представлена информация о возбужденных состояниях атомных частиц и параметрах тонкой, сверхтонкой и изотопической структуры в их спектрах. В случае молекулярных частиц будут рассмотрены спектроскопические постоянные и электронные термы наиболее распространенных двухатомных молекул.

32.2. ОПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ АТОМОВ

Линейчатый спектр нейтральных атомов в оптическом диапазоне (инфракрасном, виднмом и ультрафиолетовом, см. табл. 32.1) обусловлен, как правило, переходами внешнего валентного электрона На рис. 32.1—32.43 представлены комбинированные диаграммы уровней энергии и спектров (называемые так-

Таблица 32.1. **Сложившиеся «именные» диапазоны длин волн электромагнитного излучения**

Тип волны	Диапазон длин волн, 10^{-10} м	Диапазон энергий квантов излучения, эВ	Диапазон характерных температур T, К источника теплового излучения: $h\nu = 2{,}82\ kT$
Радиоволны:			
сверхдлинные	10^{14}—10^{18}	$1{,}2\cdot10^{-10}$—$1{,}2\cdot10^{-14}$	$5{,}1\cdot10^{-7}$—$5{,}1\cdot10^{-11}$
длинные	10^{13}—10^{14}	$1{,}2\cdot10^{-9}$—$1{,}2\cdot10^{-10}$	$5{,}1\cdot10^{-6}$—$5{,}1\cdot10^{-7}$
средние	10^{12}—10^{13}	$1{,}2\cdot10^{-8}$—$1{,}2\cdot10^{-9}$	$5{,}1\cdot10^{-5}$—$5{,}1\cdot10^{-6}$
короткие	10^{11}—10^{12}	$1{,}2\cdot10^{-7}$—$1{,}2\cdot10^{-8}$	$5{,}1\cdot10^{-4}$—$5{,}1\cdot10^{-5}$
ультракороткие (УКВ)	10^{6}—10^{11}	0,0124—$1{,}2\cdot10^{-7}$	51—$5{,}1\cdot10^{-4}$
Инфракрасное излучение:			
далекое	10^{5}—10^{7}	0,124—$1{,}24\cdot10^{-3}$	510—5
близкое	7500—10^{5}	1,65—0,124	6803—510
Видимый свет:			
красный	6500—7500	1,91—1,65	7849—6803
оранжевый	5900—6500	2,10—1,91	8647—7849
желтый	5300—5900	2,34—2,10	9626—8647
зеленый	4900—5300	2,53—2,34	10 412—9626
синий	4200—4900	2,95—2,53	12 148—10 412
фиолетовый	4000—4200	3,10—2,95	12 755—12 148
Ультрафиолетовое излучение:			
ближнее	2000—4000	6,20—3,10	25 510—12 755
дальнее (вакуумное)	100—2000	124—6,20	$5{,}1\cdot10^{5}$—25 510
Рентгеновское излучение:			
мягкое	1—20	$1{,}24\cdot10^{4}$—620	$5{,}1\cdot10^{7}$—$2{,}6\cdot10^{6}$
жесткое	0,06—1	$2{,}07\cdot10^{5}$—$1{,}24\cdot10^{4}$	$8{,}5\cdot10^{8}$—$5{,}1\cdot10^{7}$
Гамма-излучение	$5\cdot10^{-4}$—2	$2{,}48\cdot10^{7}$—$6{,}2\cdot10^{3}$	$1{,}0\cdot10^{11}$—$2{,}5\cdot10^{7}$

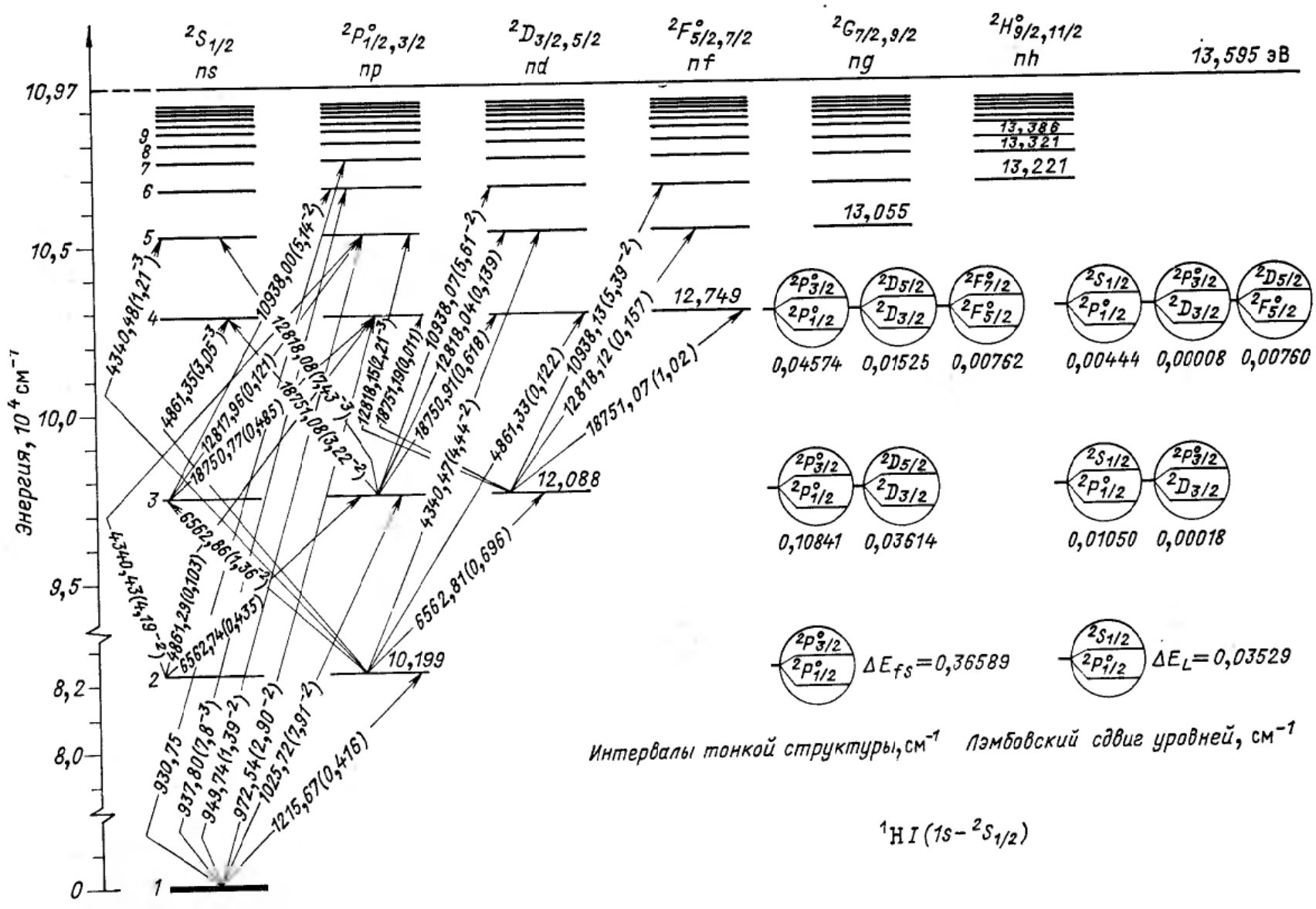


Рис. 32.1. Диаграмма Гротриана для атома водорода

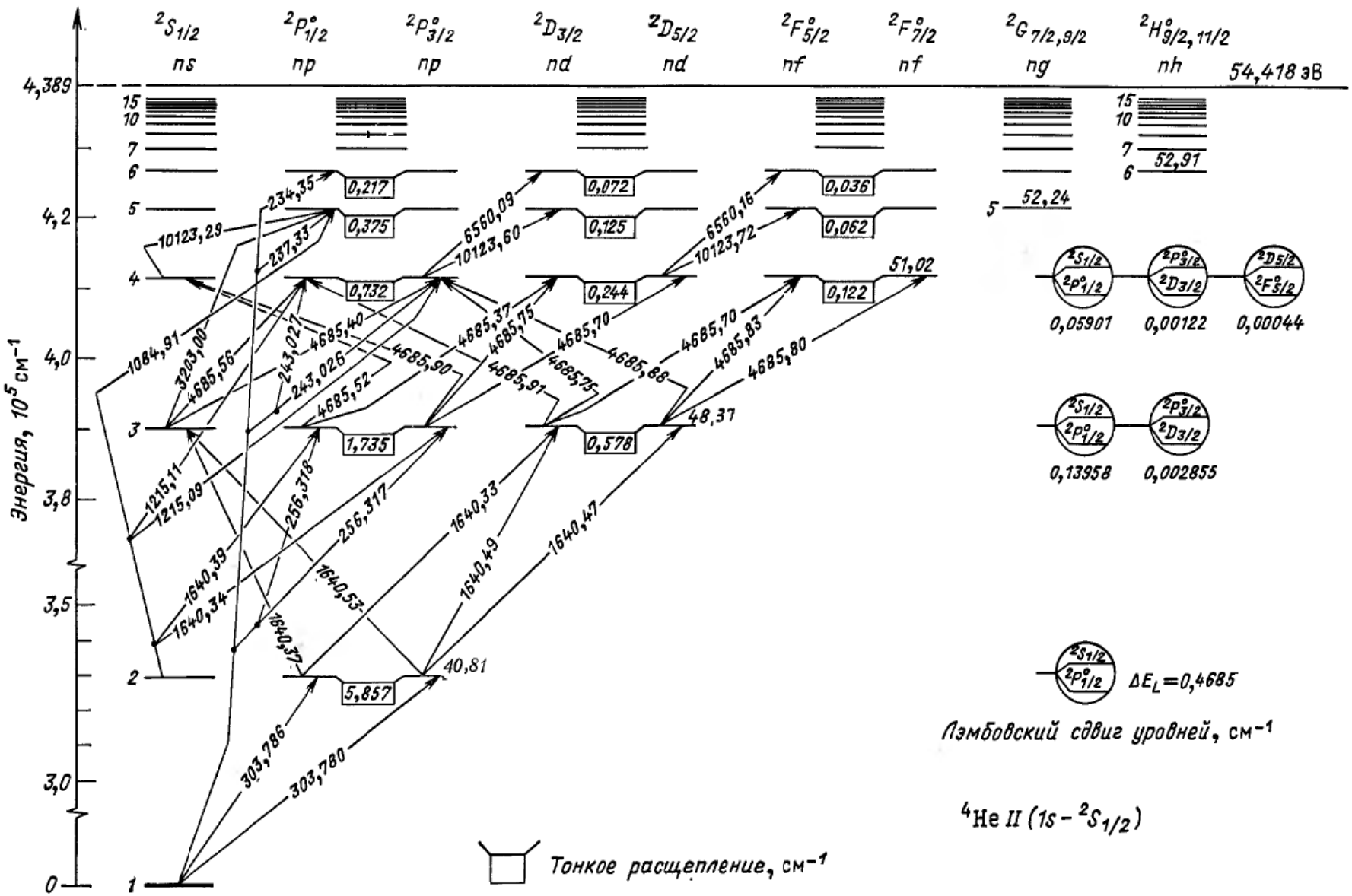


Рис. 32.2. Днаграмма Гротриана для иона гелия

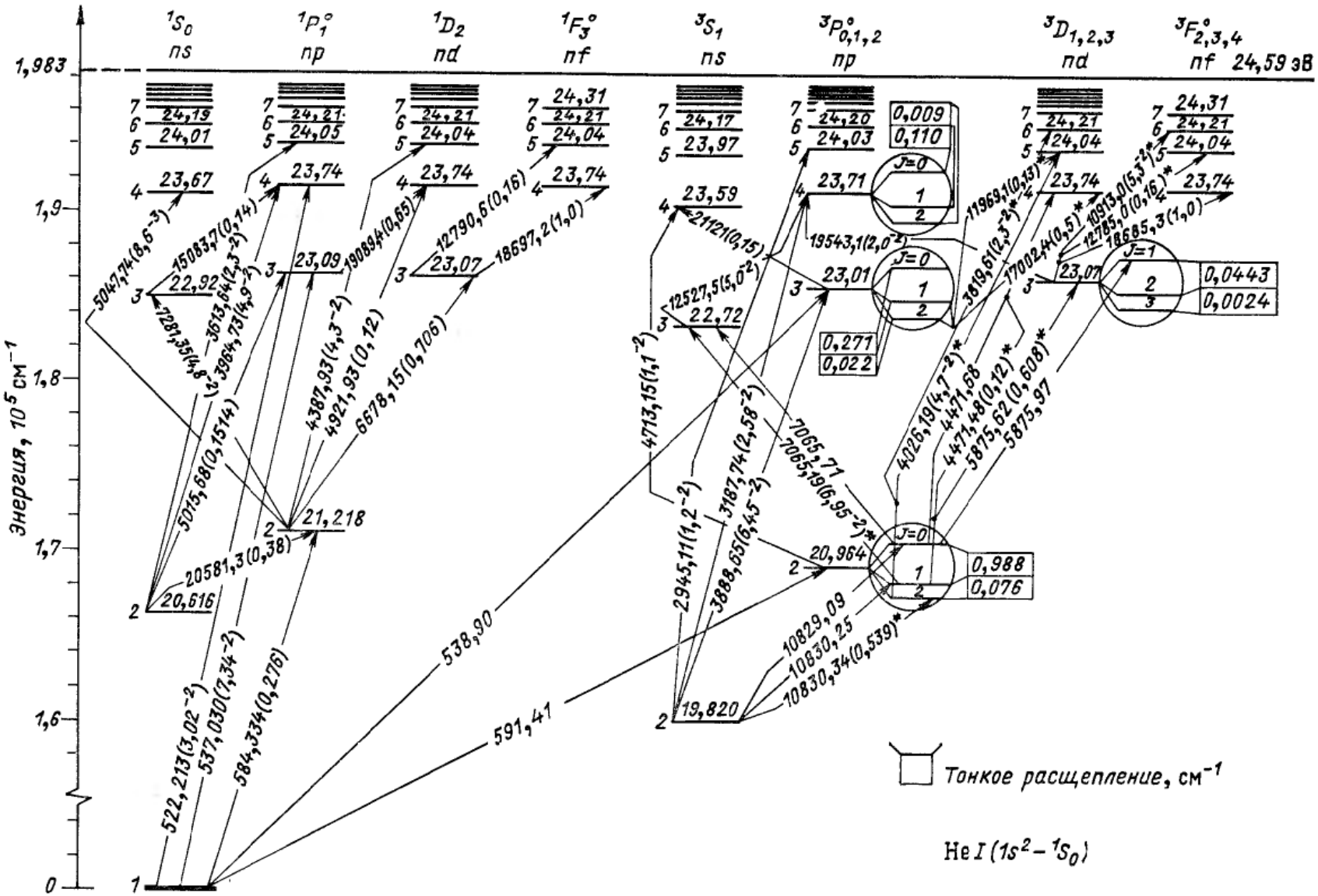


Рис. 32.3. Диаграмма Гротриана для атома гелия

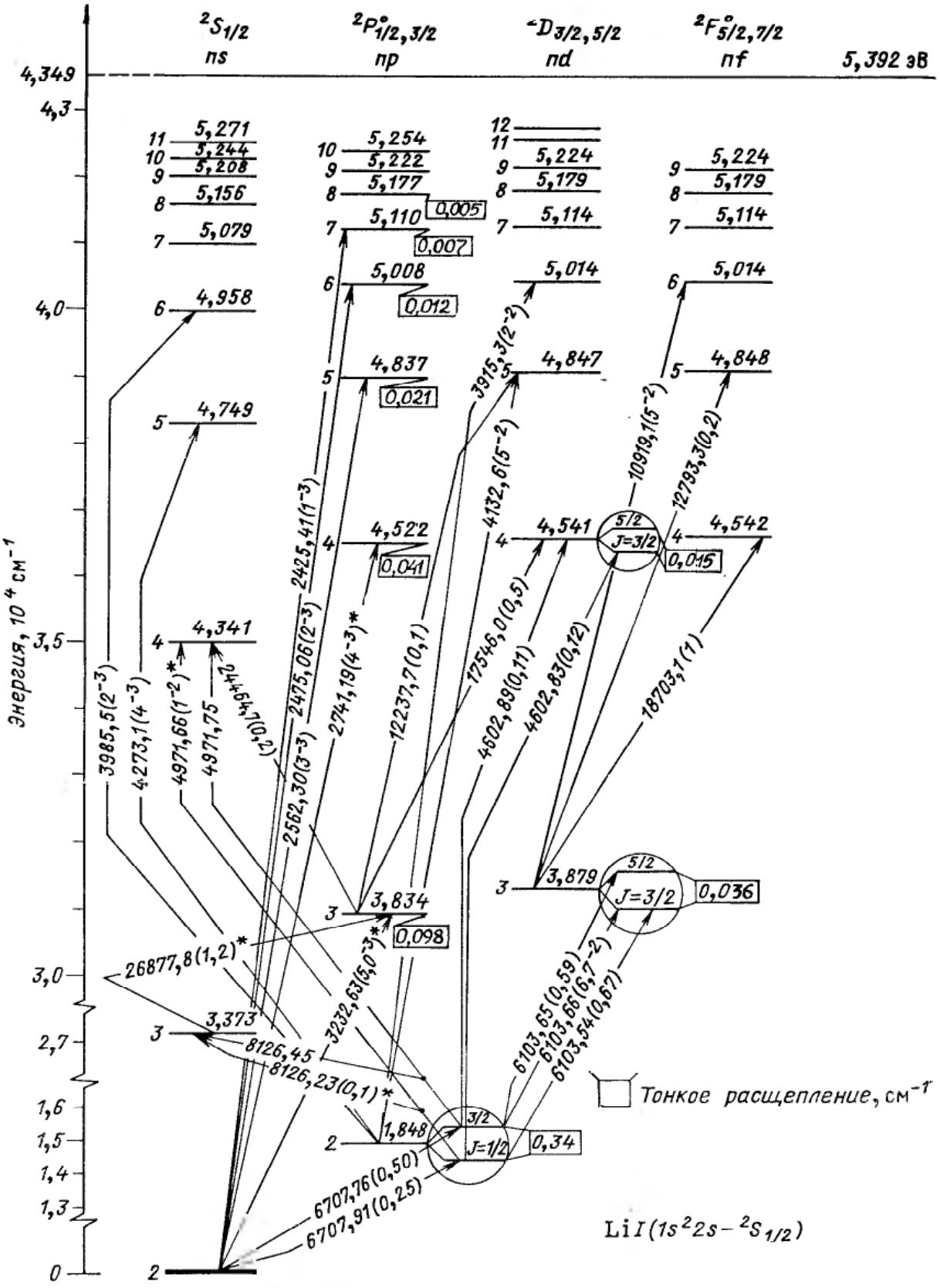


Рис. 32.4. Диаграмма Гротриана для атома лития

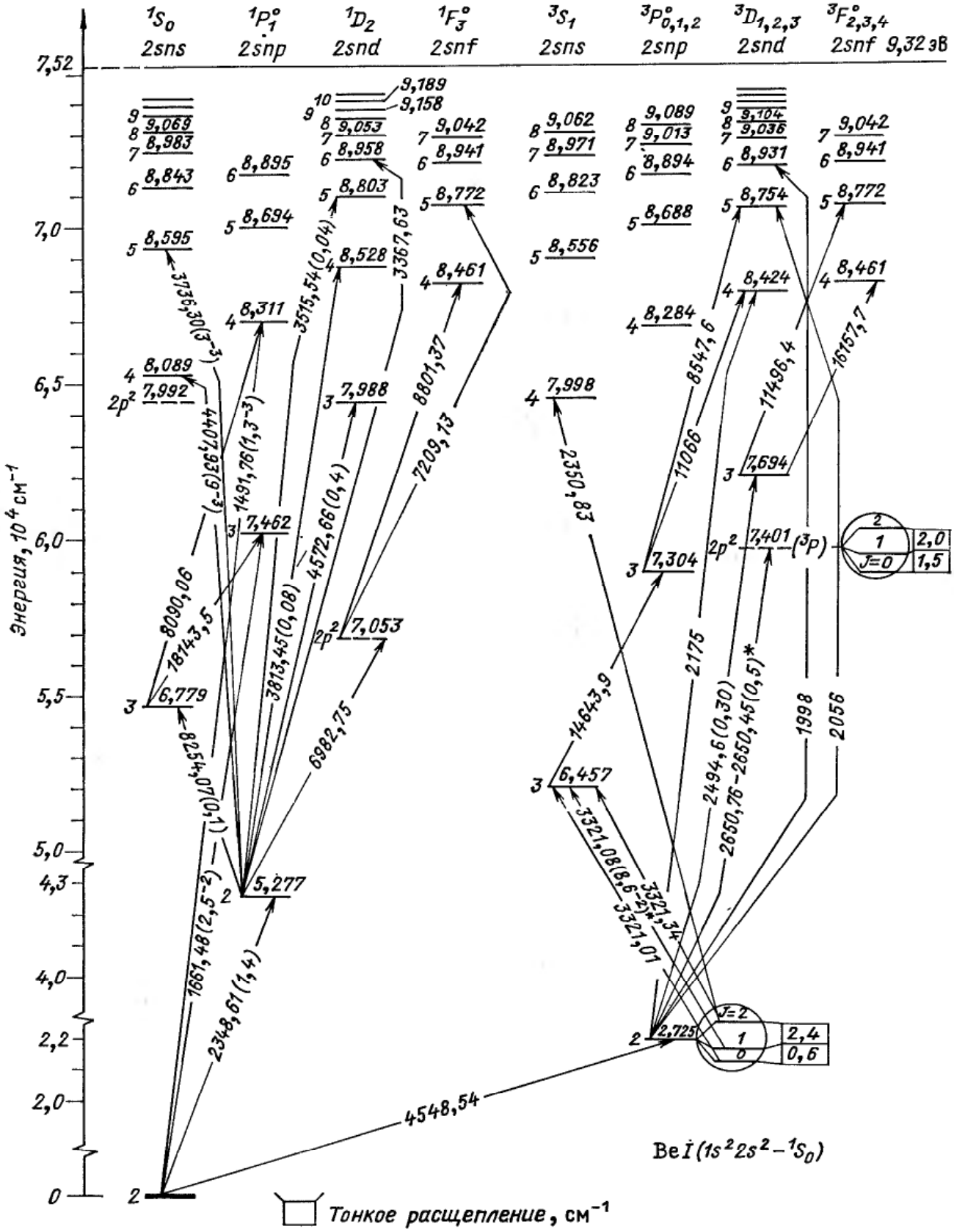


Рис. 32.5. Диаграмма Гротриана для атома бериллия

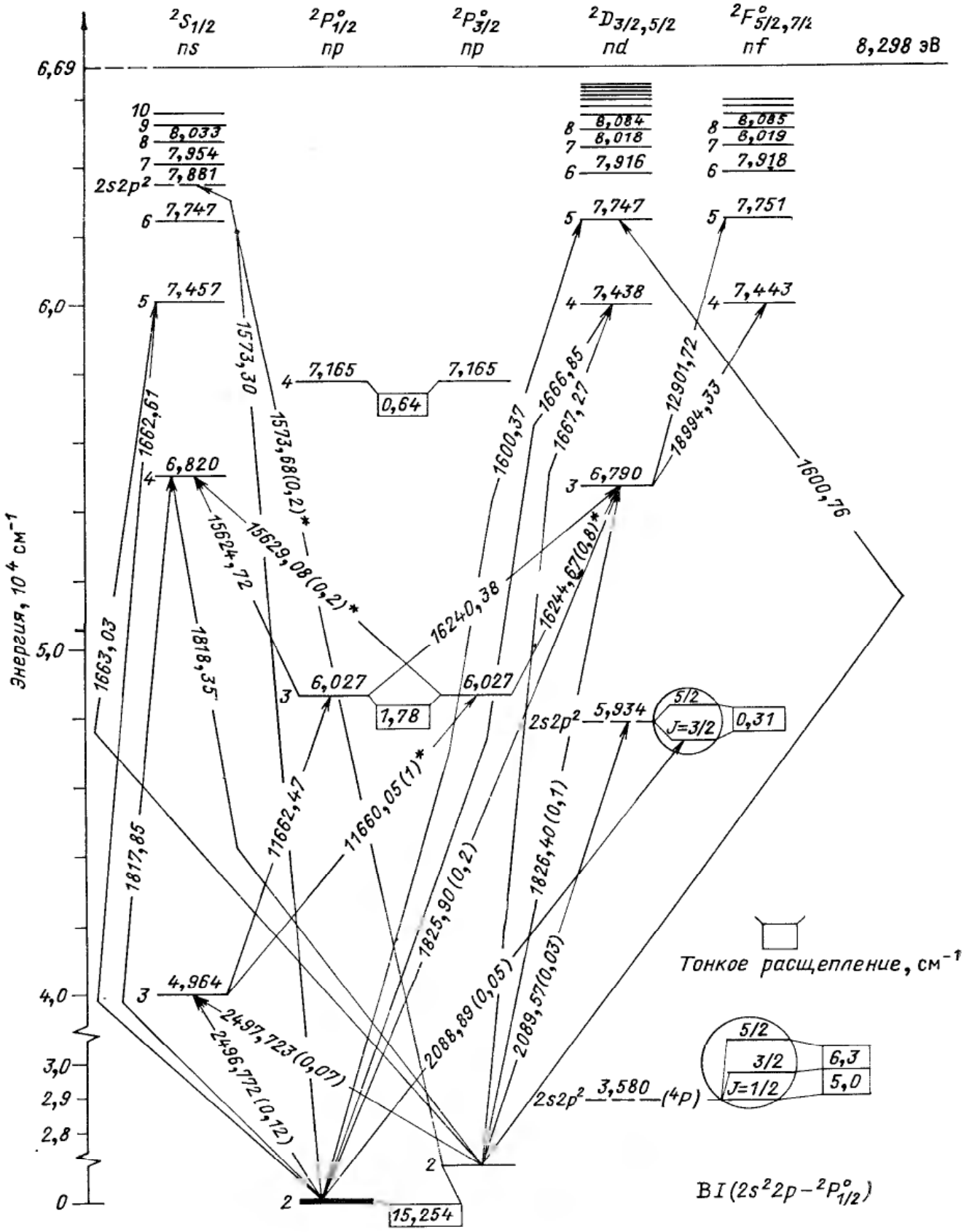


Рис. 32.6. Диаграмма Гротриана для атома бора

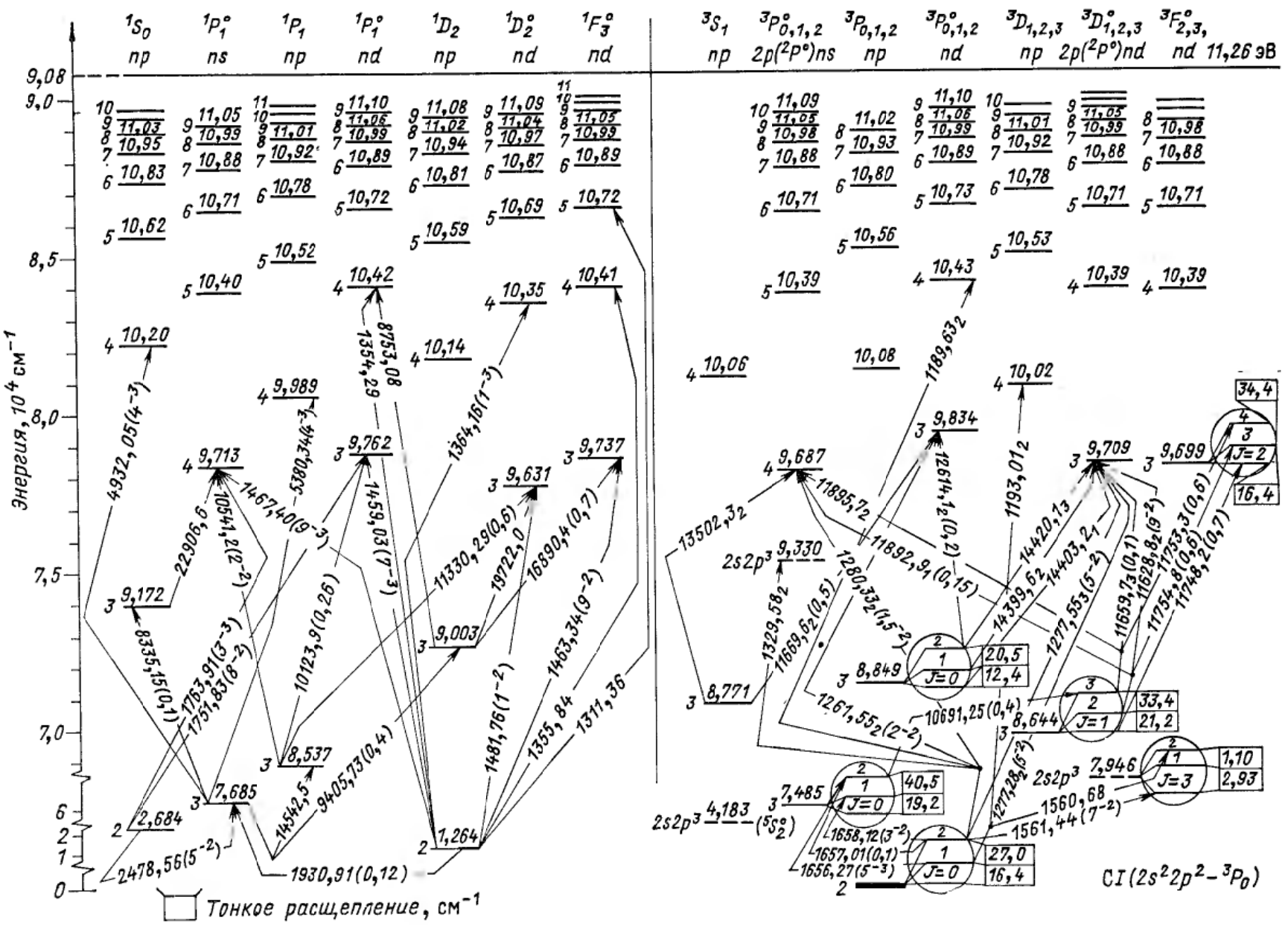


Рис. 32.7. Диаграмма Гротриана для атома углерода

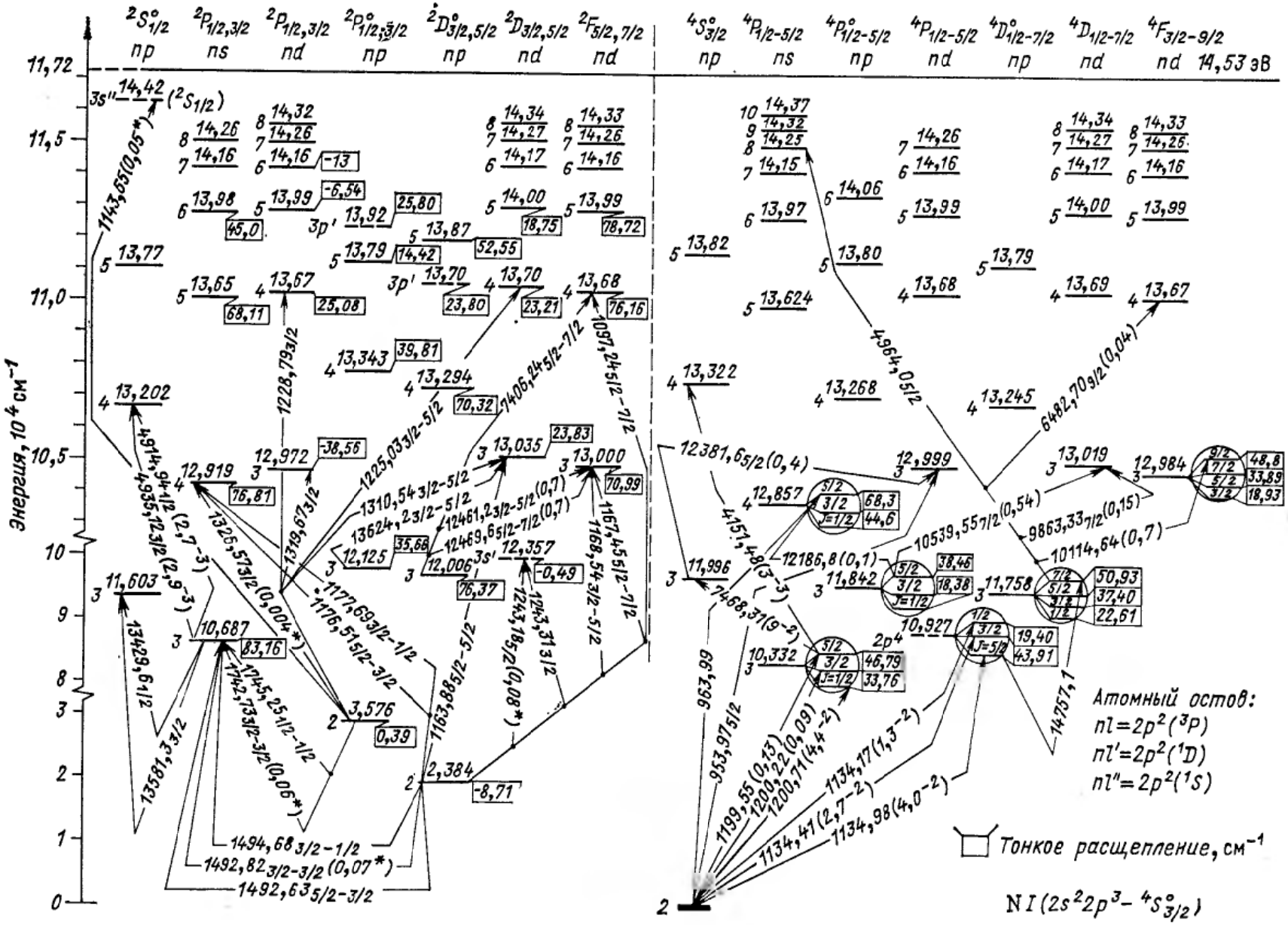


Рис. 32.8. Диаграмма Гротриана для атома азота

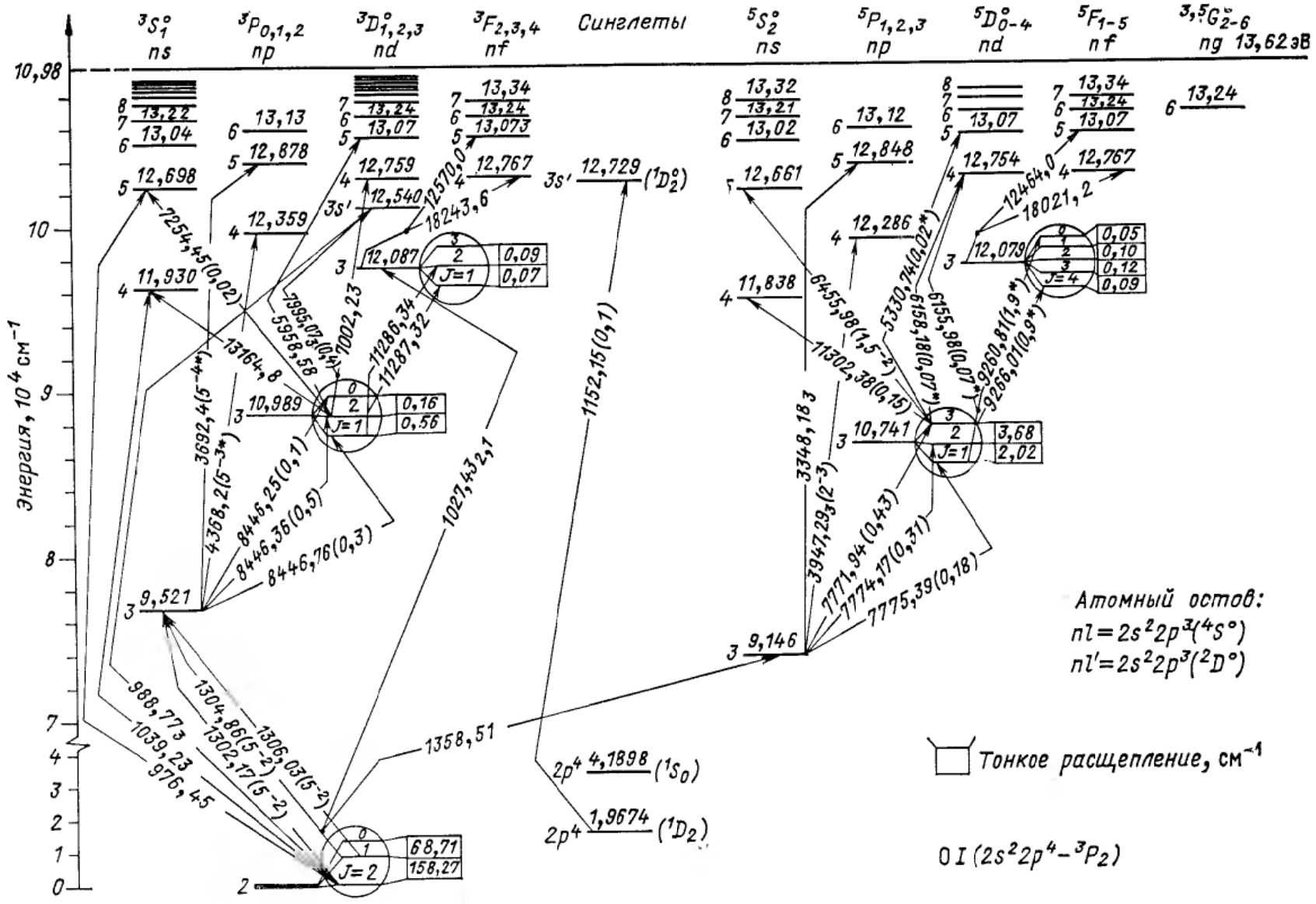


Рис. 32.9 Диаграмма Гротриана для атома кислорода

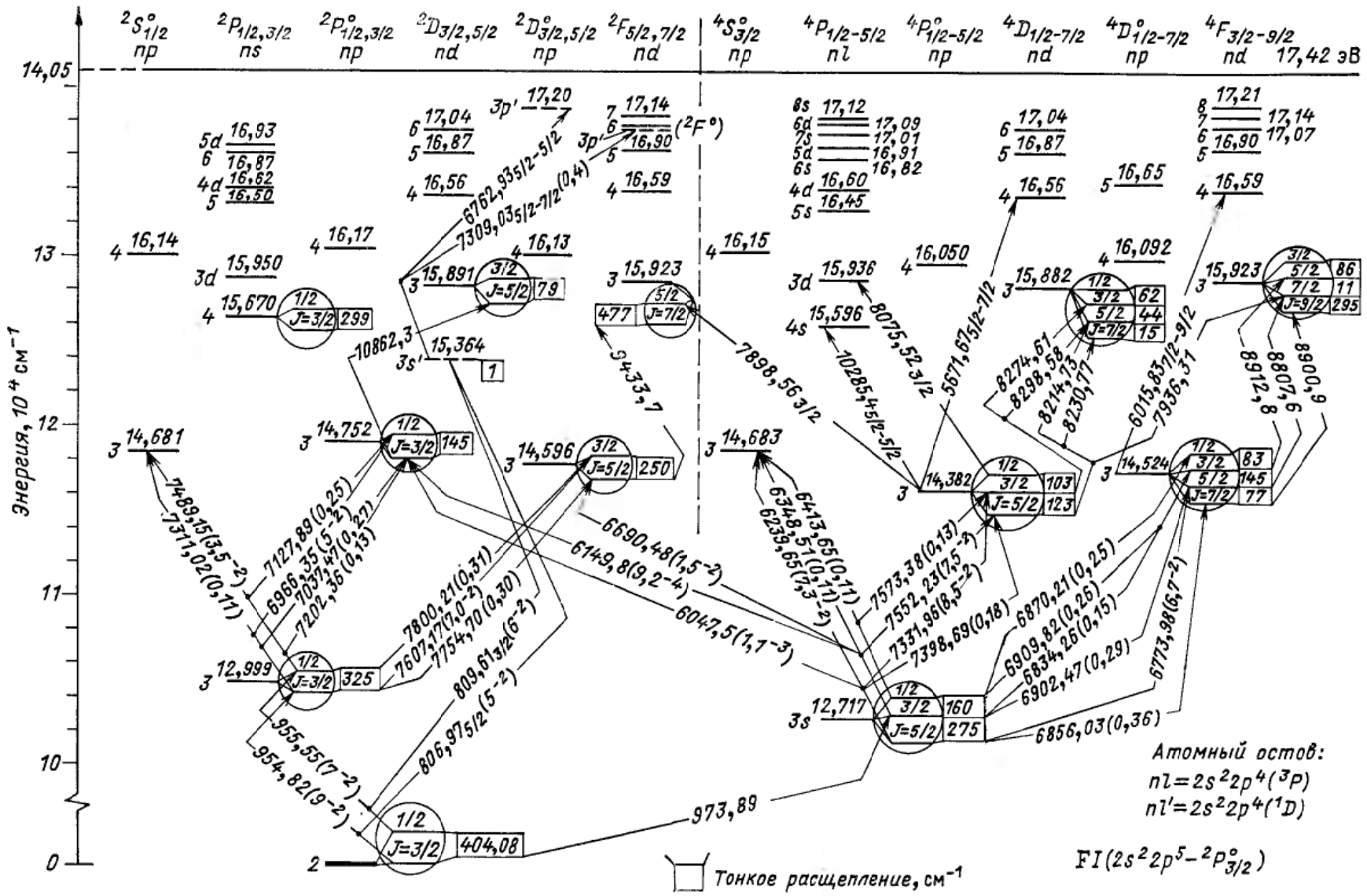


Рис. 32.10. Диаграмма Гротриана для атома фтора

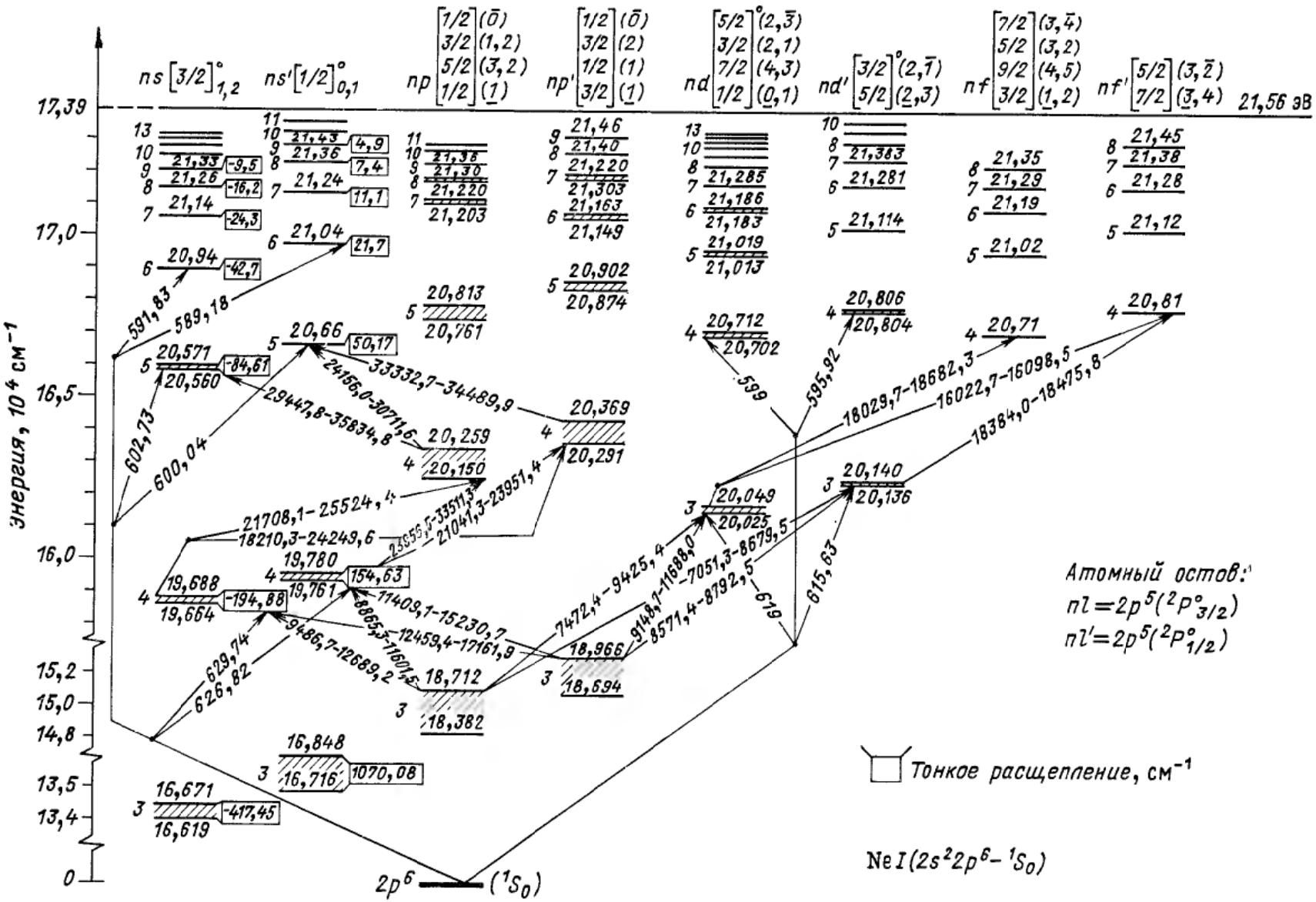


Рис. 32.11. Диаграмма Гротриана для атома неона

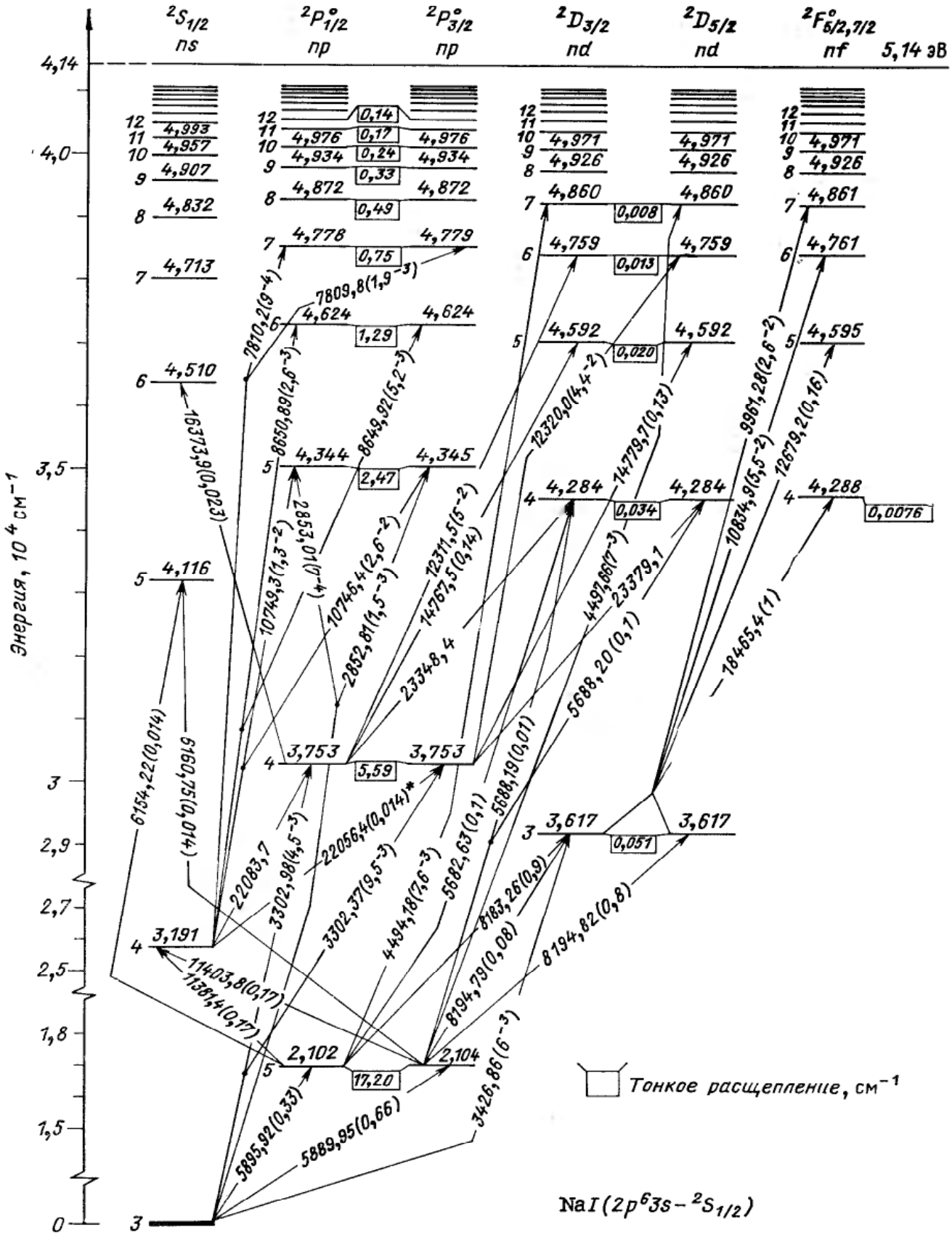


Рис. 32.12. Диаграмма Гротриана для атома натрия

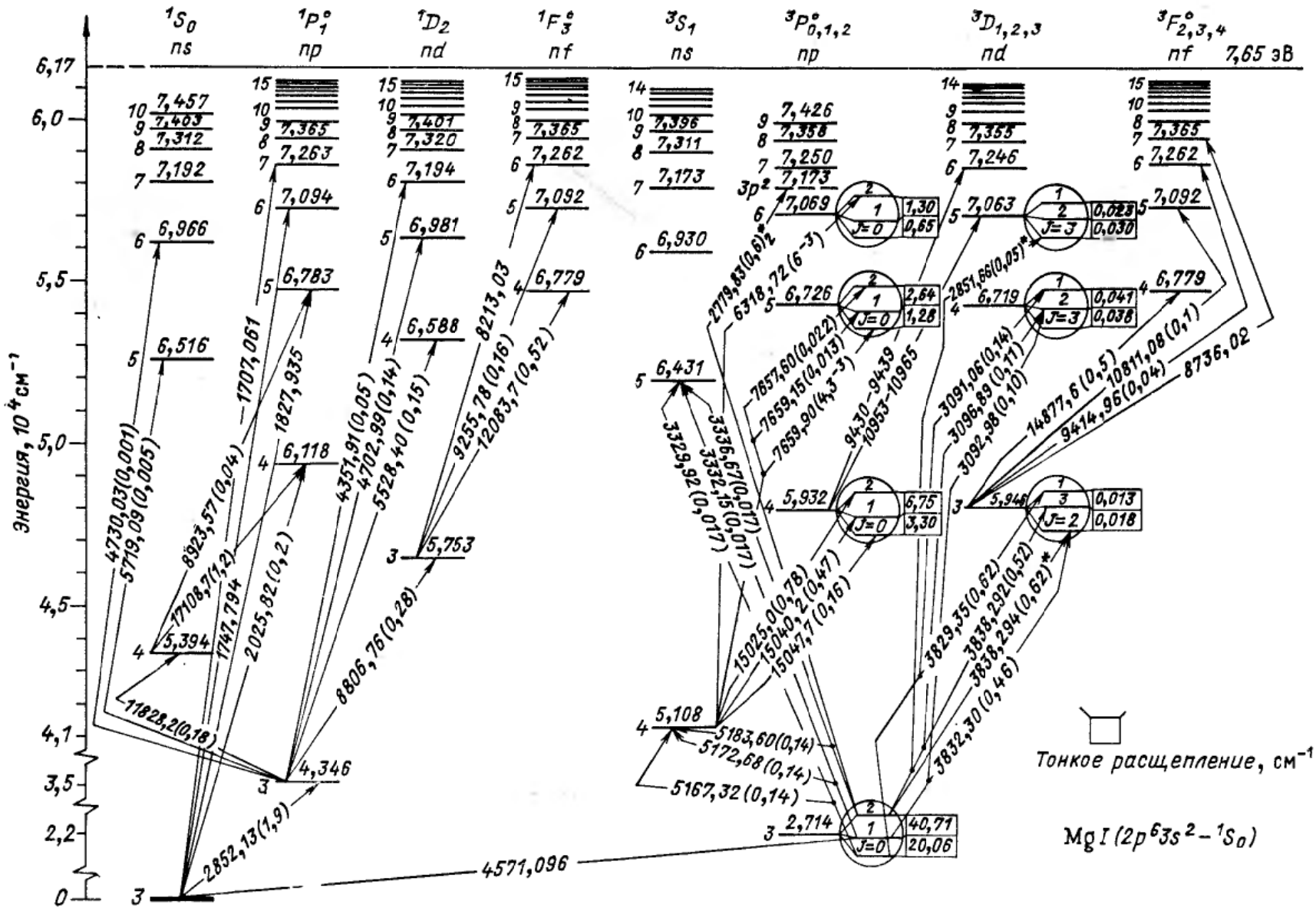


Рис. 32.13. Диаграмма Гротриана для атома магния

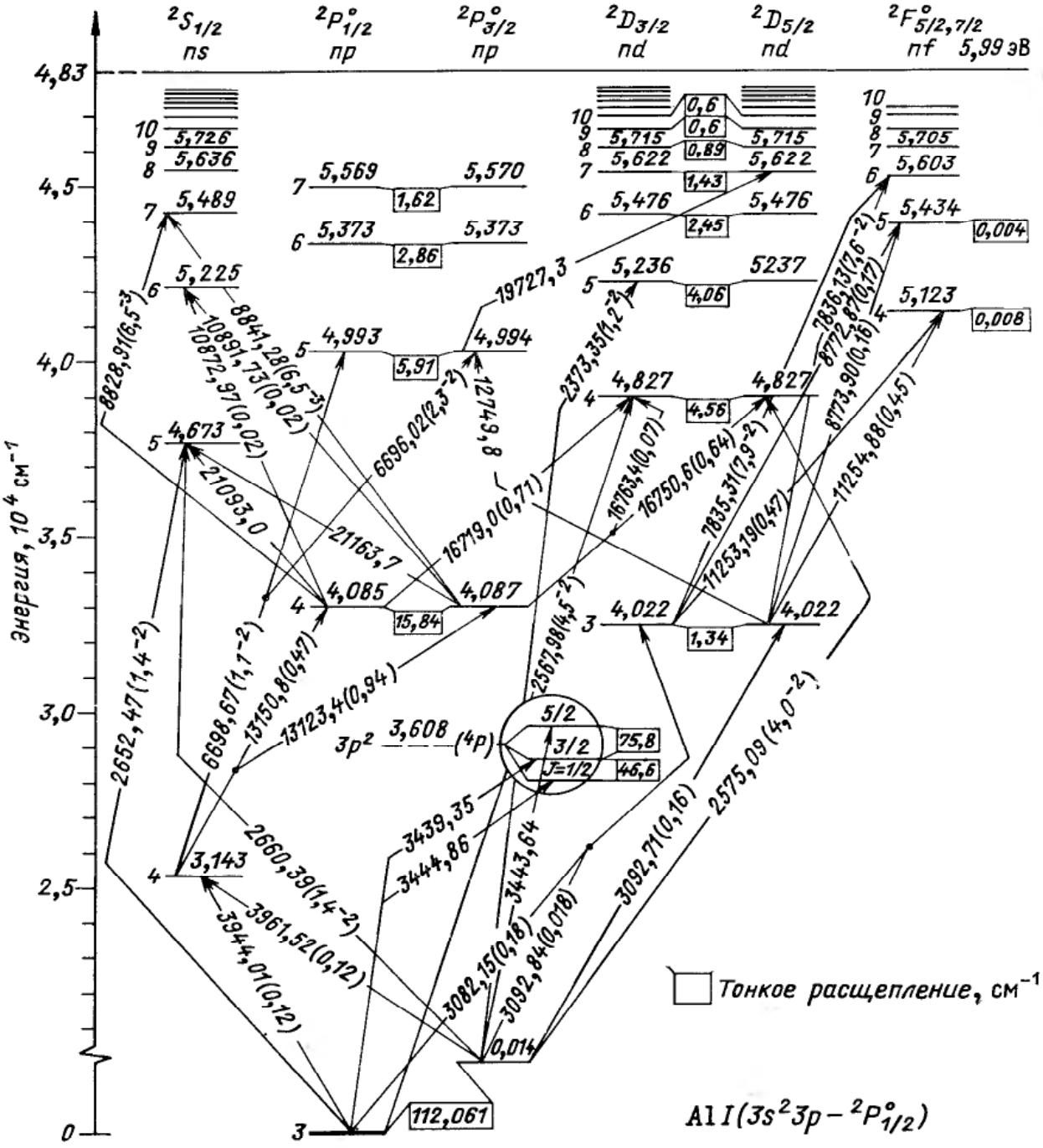


Рис. 32.14. Диаграмма Гротриана для атома алюминия

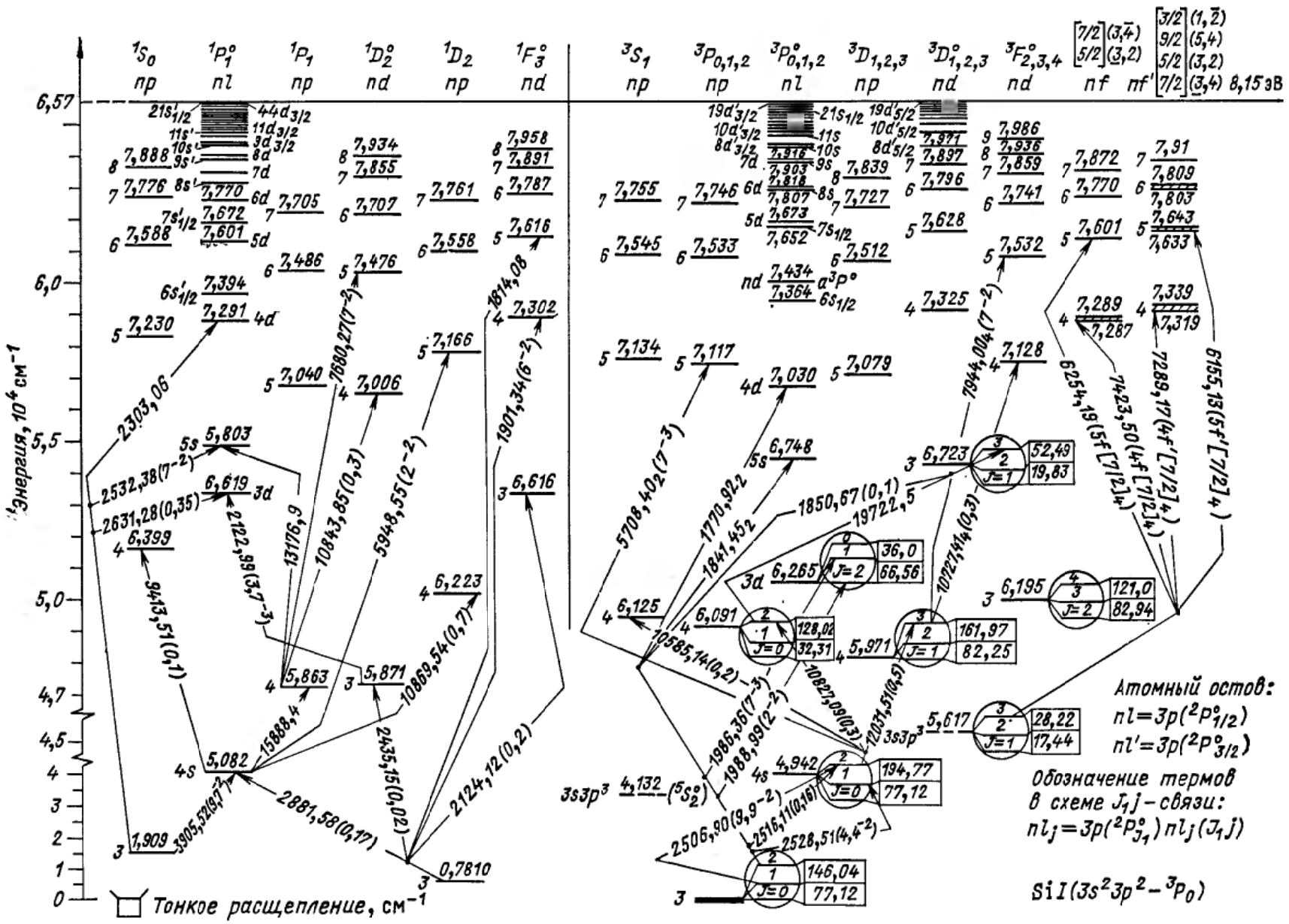


Рис. 32.15. Диаграмма Гротриана для атома кремния

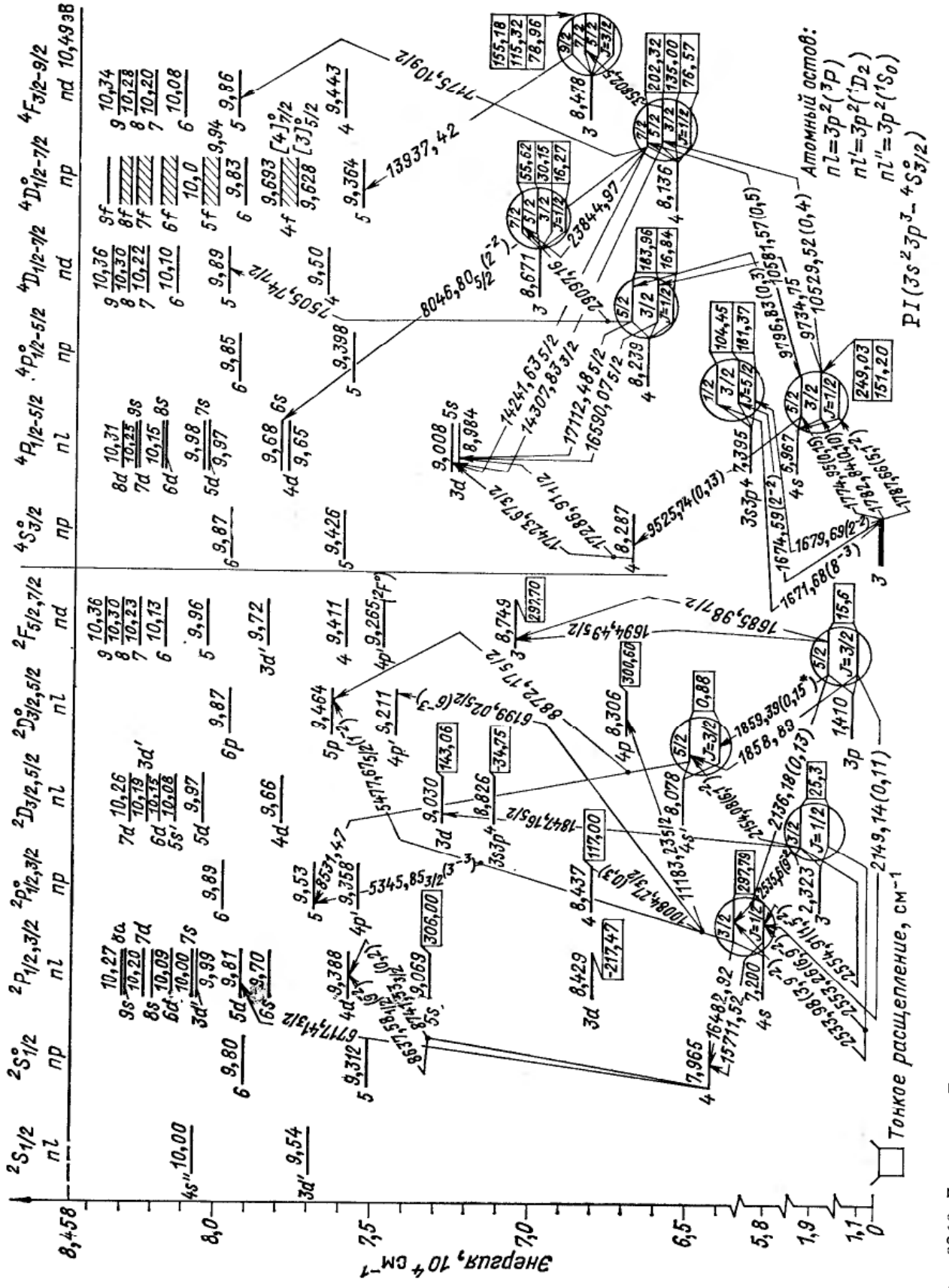


Рис. 32.16. Диаграмма Гротриана для атома фосфора

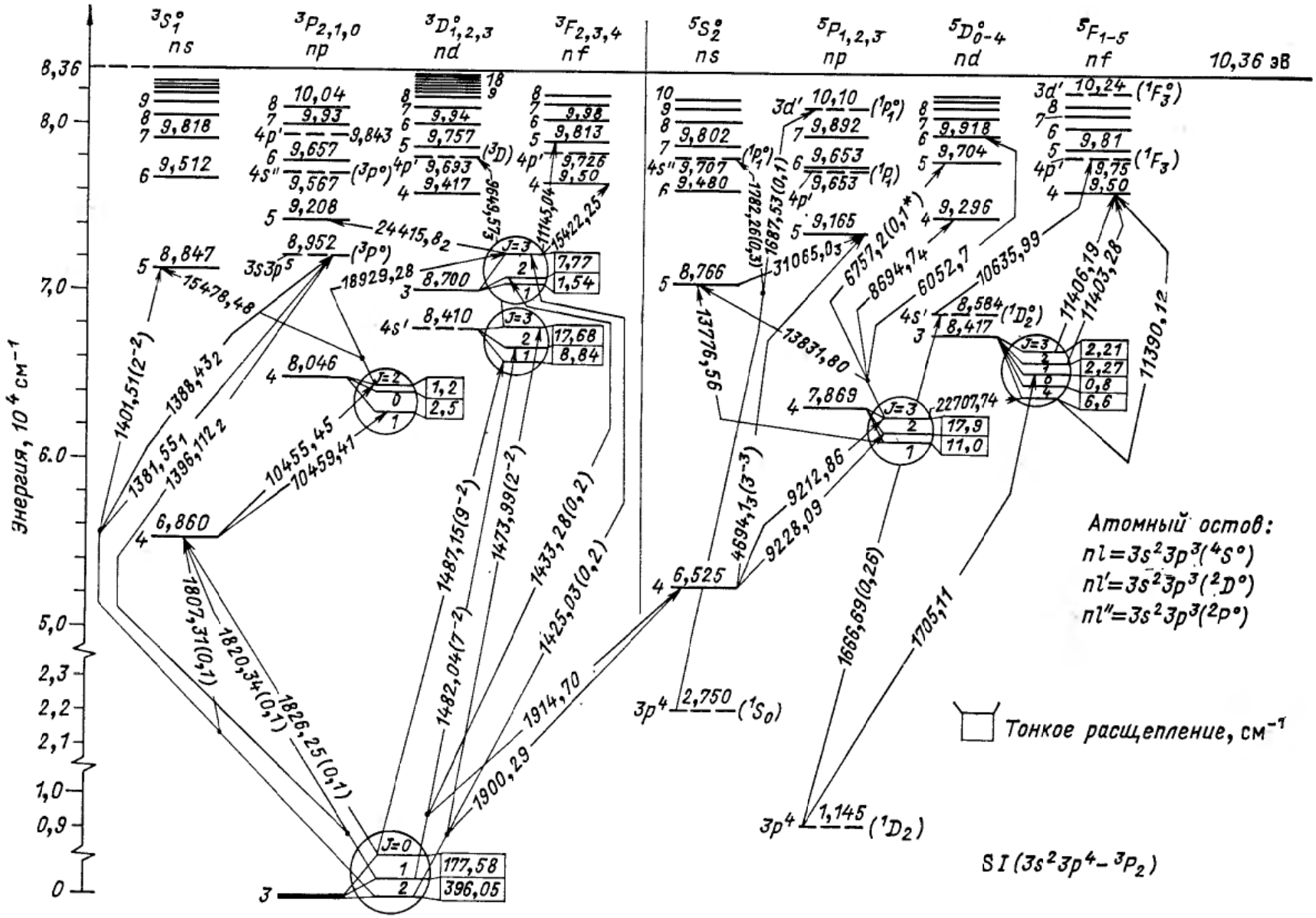


Рис. 32.17. Диаграмма Гротриана для атома серы

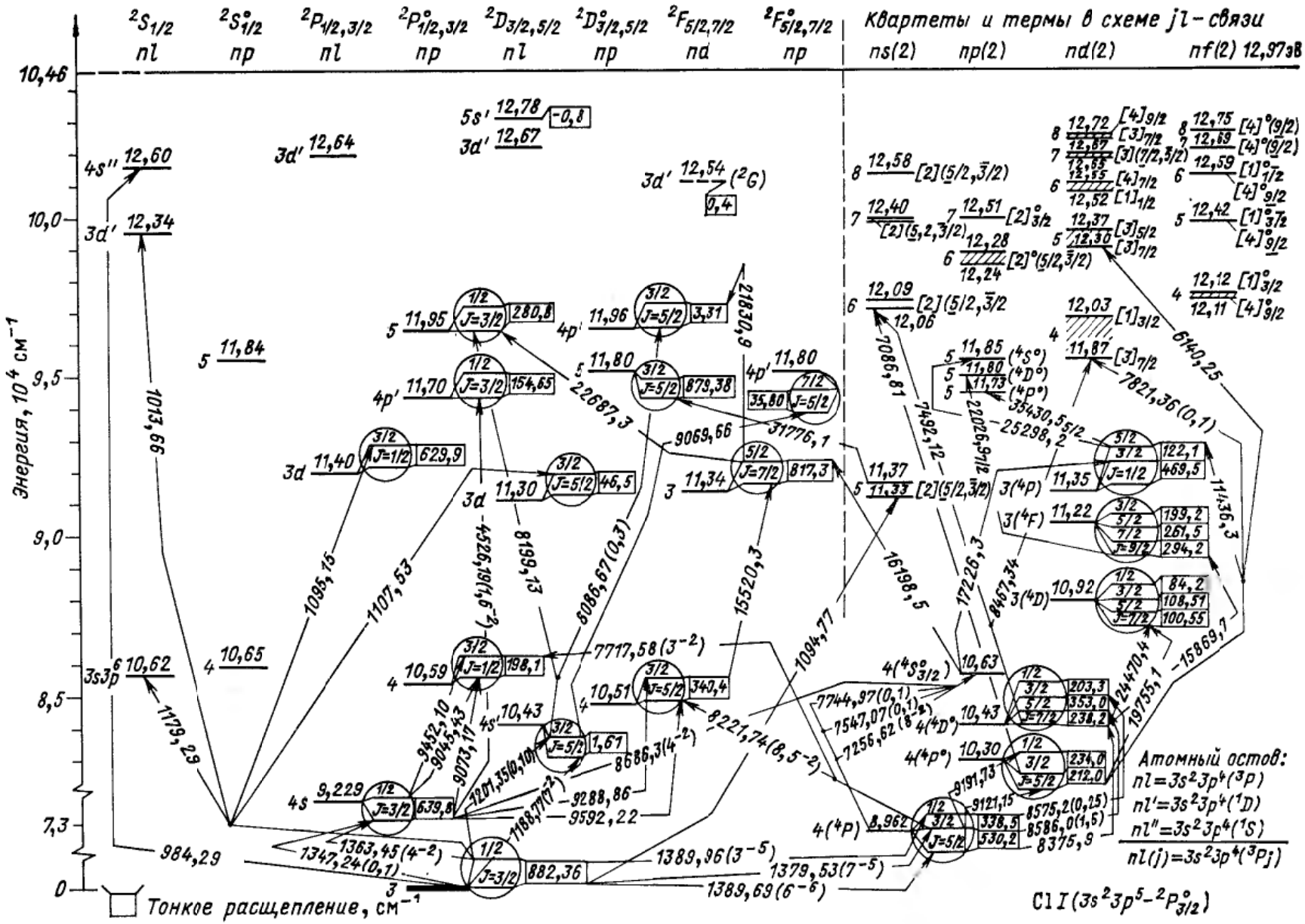


Рис. 32.18. Диаграмма Гротриана для атома хлора

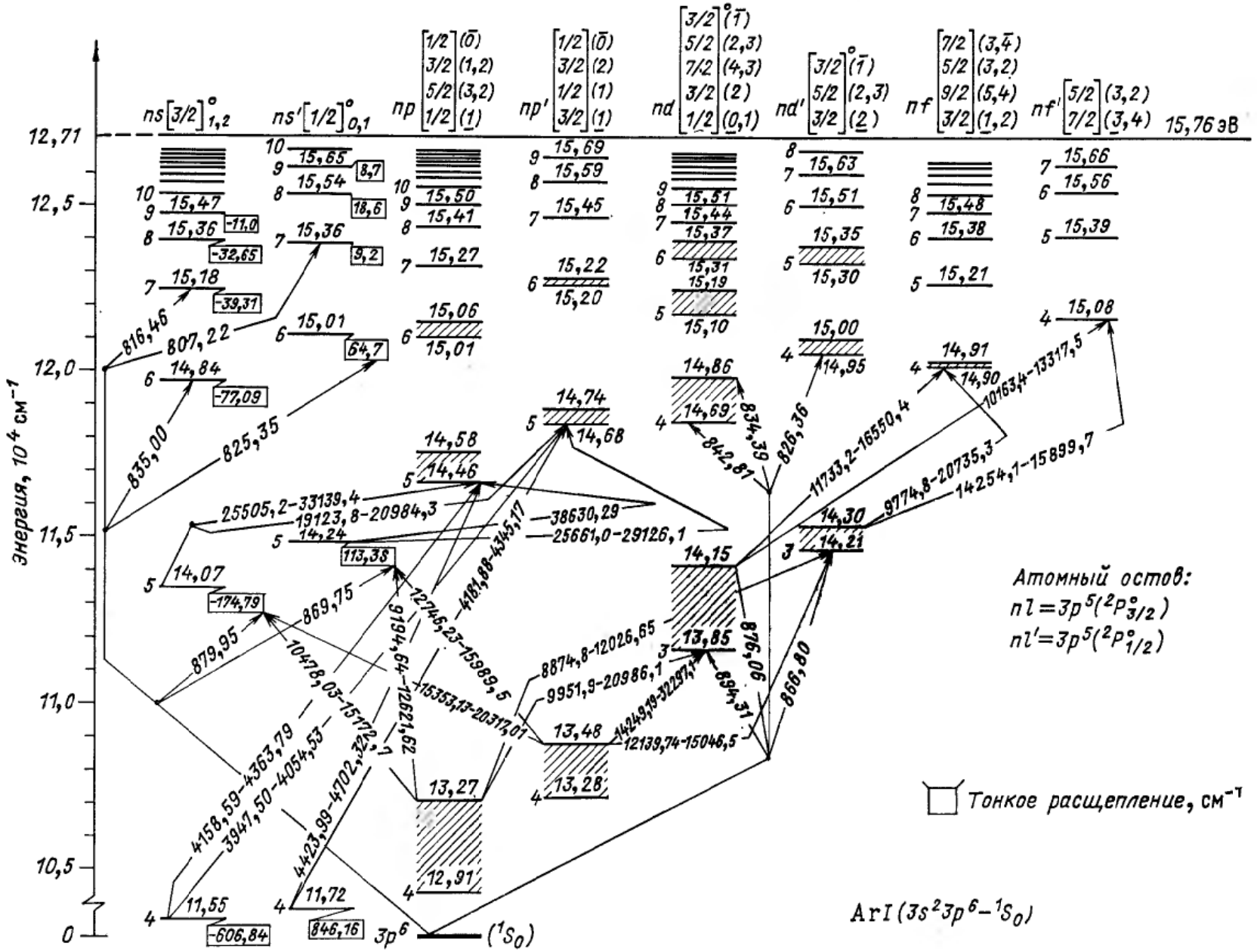


Рис. 32.19. Диаграмма Гротриана для атома аргона

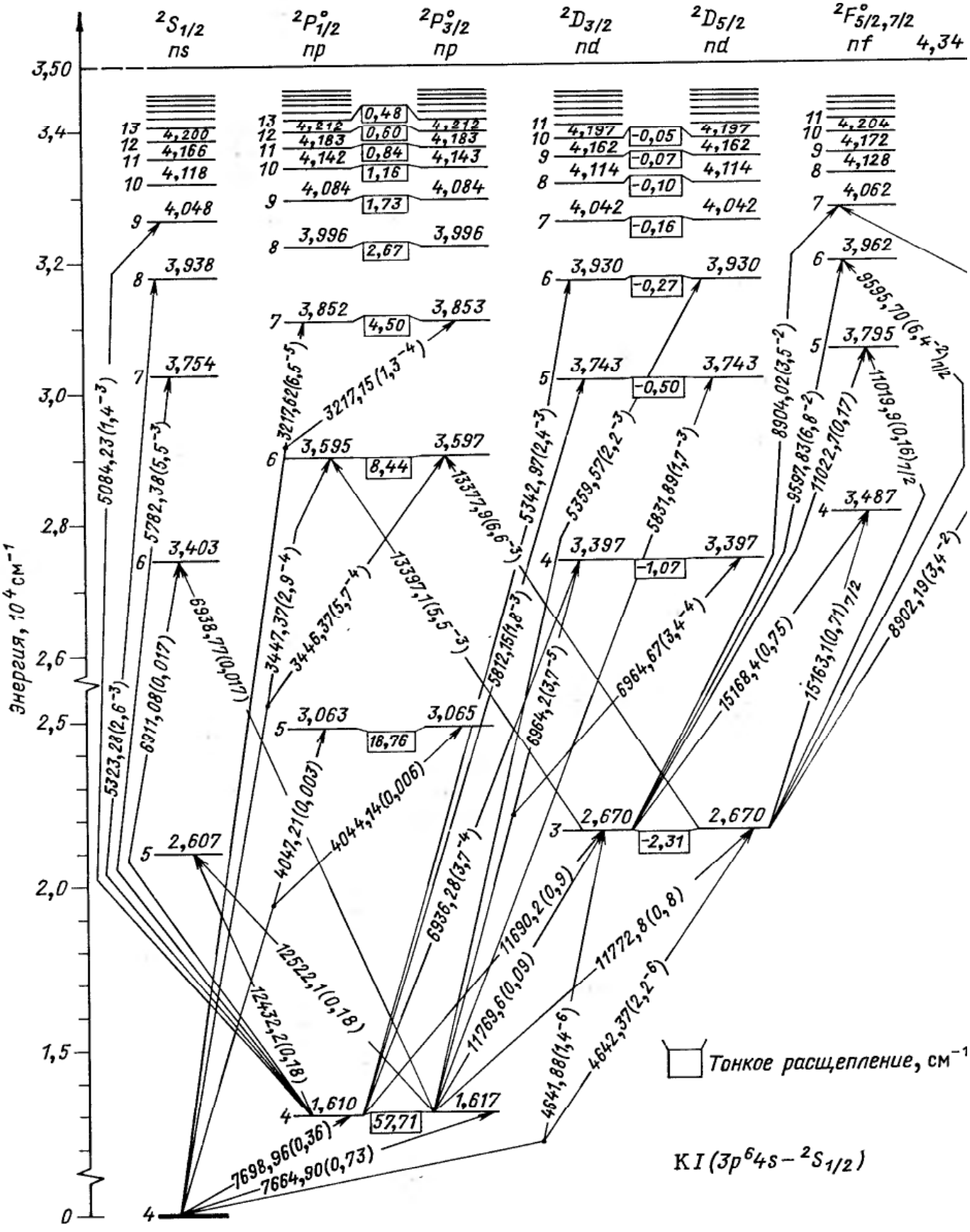


Рис. 32.20. Диаграмма Гротриана для атома калия

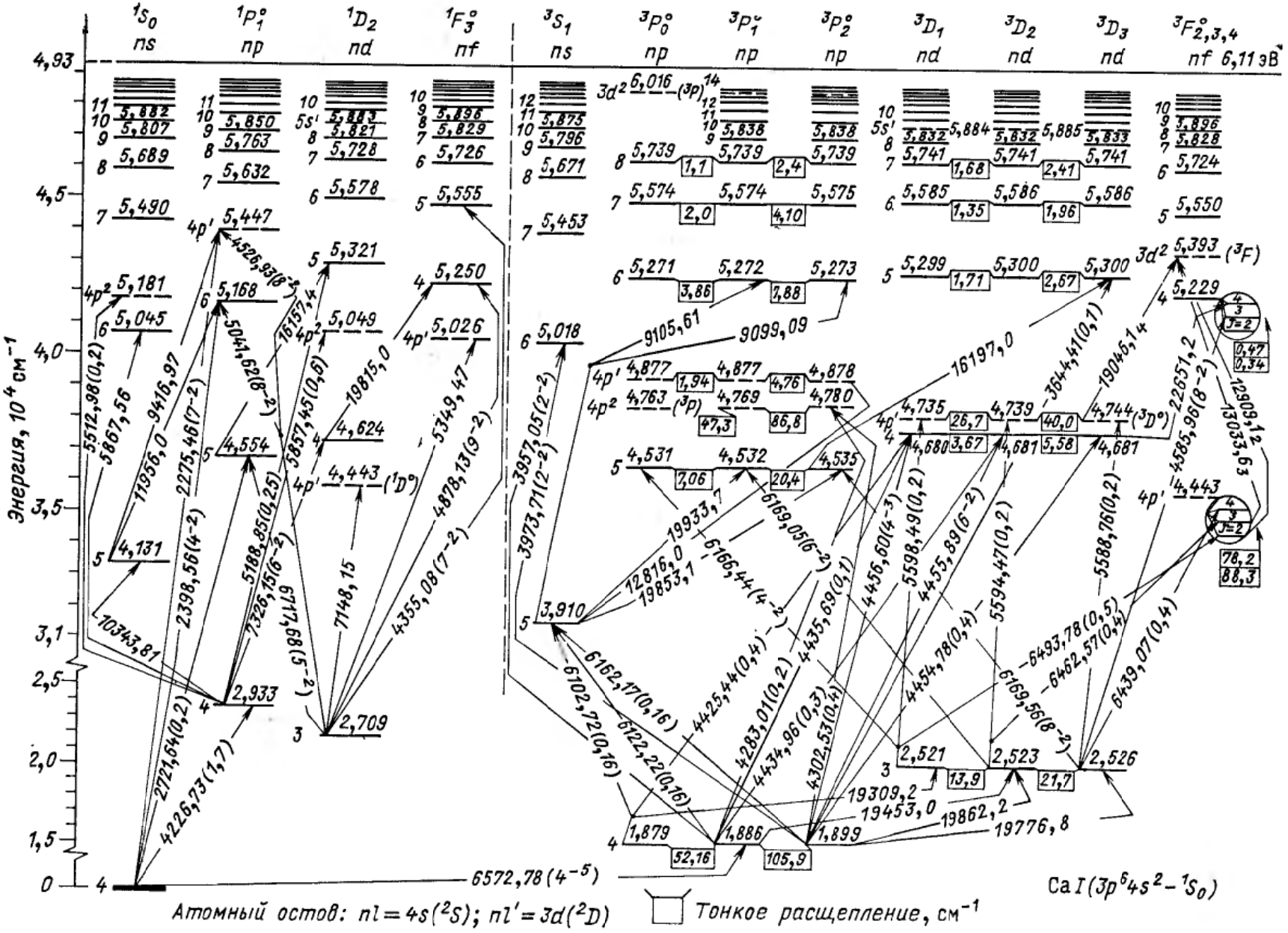
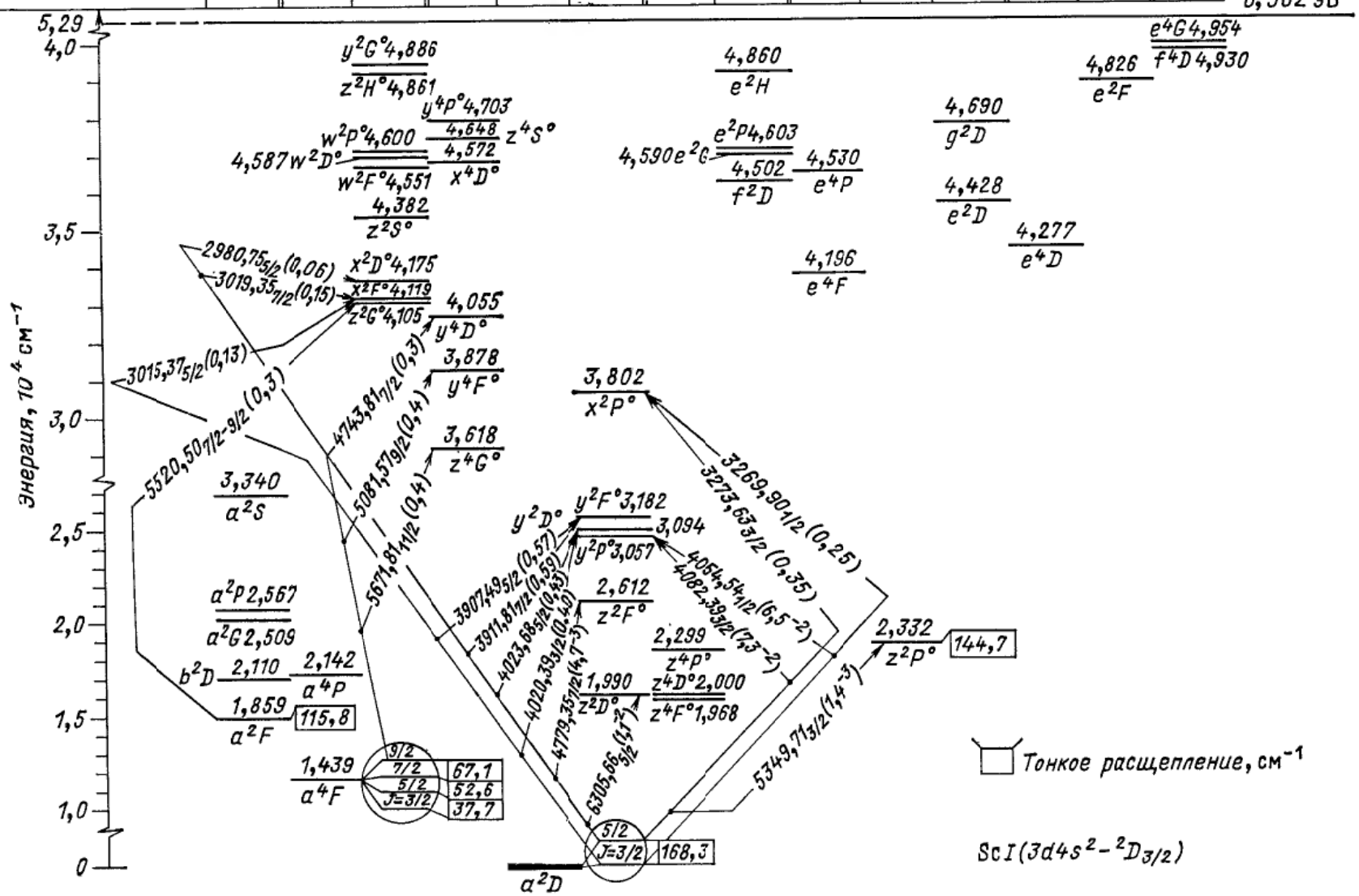


Рис. 32.21. Диаграмма Гротриана для атома кальция

Четность (P)	+1		−1		+1	−1		+1		−1	+1		+1	
Эл. конфигурация	$3d^24s$		$3d^24p$		$3d4s^2$	$3d4s4p$		$3d^3$		$4s^24p$	$3d4s5s$		$3d4s4d$	
Мультиплетность (2S+1)	2	4	2	4	2	2	4	2	4	2	2	4	2	4



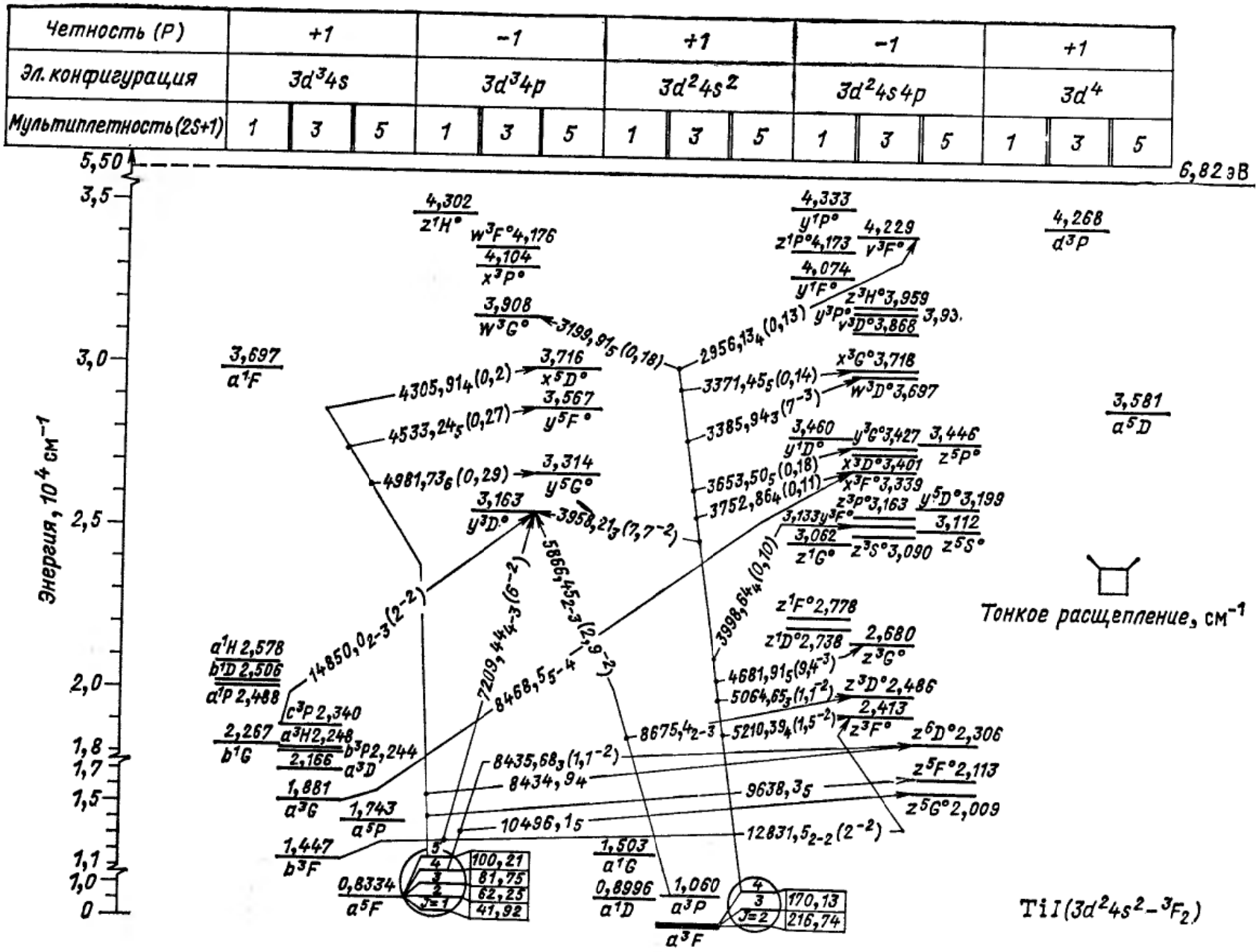
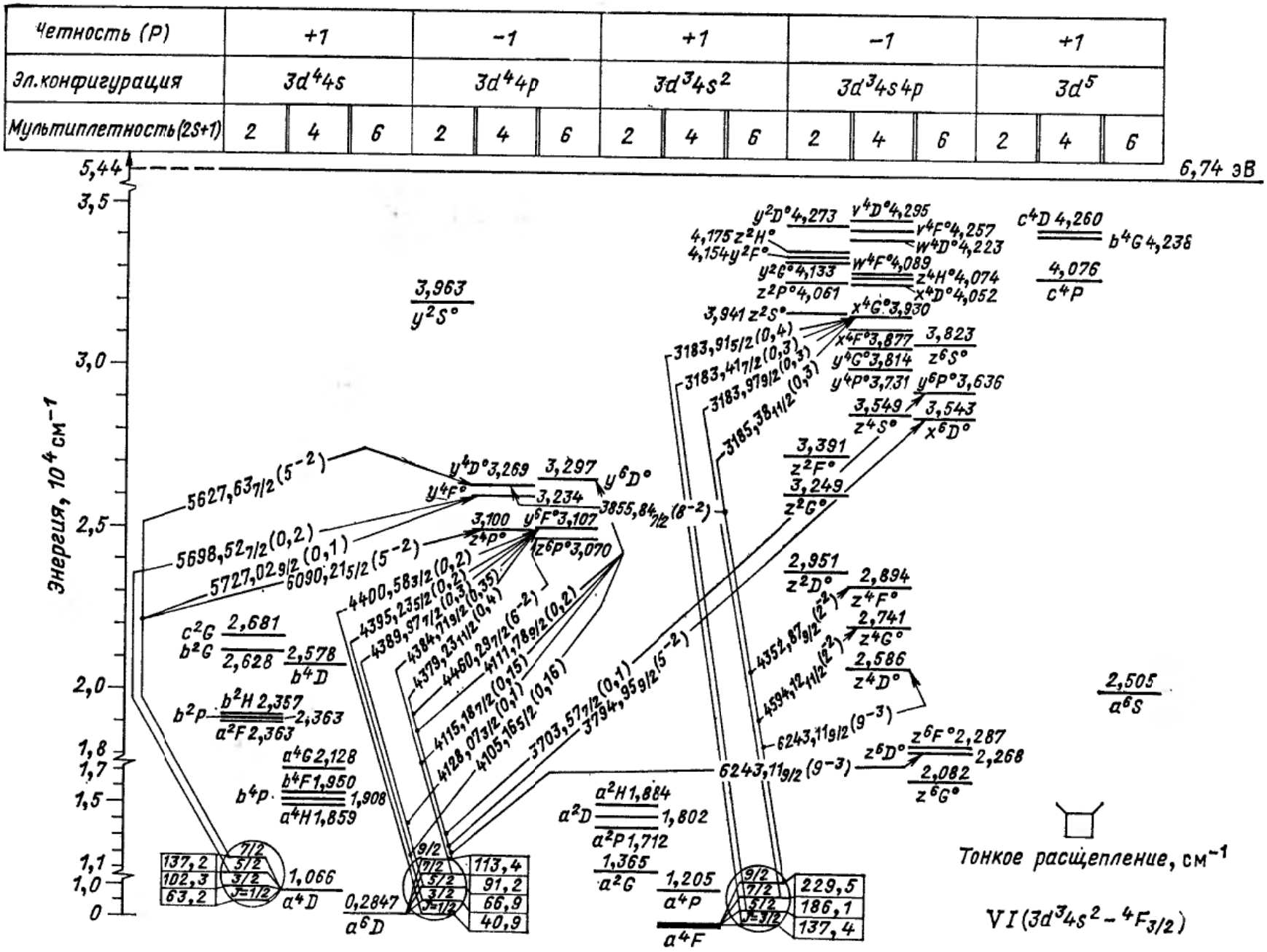


Рис. 32.23. Диаграмма Гротриана для атома титана


Четность (P)
+1
−1
+1
−1
+1
Эл.конфигурация
3d⁴4s
3d⁴4p
3d³4s²
3d³4s4p
3d⁵
Мультиплетность (2S+1)
2 4 6 2 4 6 2 4 6 2 4 6 2 4 6
6,74 эВ
5,44
3,5
3,0
2,5
2,0
1,8
1,7
1,5
1,1
1,0
0
Энергия, 10⁴ см⁻¹
3,963
y²S°
y²D°4,273
v⁴D°4,295
v⁴F°4,257
W⁴D°4,223
4,175 z²H°
4,154 y²F°
y²G°4,133
W⁴F°4,089
z⁴H°4,074
z²P°4,061
x⁴D°4,052
3,941 z²S°
x⁴G°3,930
c⁴D 4,260
b⁴G 4,238
4,076
c⁴P
3183,91 5/2 (0,4)
3183,41 7/2 (0,3)
3183,97 9/2 (0,3)
3185,38 11/2 (0,3)
x⁴F°3,877
y⁴G°3,814
y⁴P°3,731
3,823
z⁶S°
y⁶P°3,636
3,549
z⁴S°
3,543
x⁶D°
3,391
z²F°
3,249
z²G°
3855,84 7/2 (8⁻²)
y⁶D°
y⁴D°3,269
3,297
y⁴F°
3,234
3,100
z⁴P°
y⁶F°3,107
z⁶P°3,070
5627,63 7/2 (5⁻²)
5698,52 7/2 (0,2)
5727,02 9/2 (0,1)
6090,21 5/2 (5⁻²)
4400,58 3/2 (0,2)
4395,23 5/2 (0,2)
4389,57 7/2 (0,3)
4384,71 9/2 (0,35)
4379,23 11/2 (0,4)
4460,29 7/2 (6⁻²)
4111,78 9/2 (0,2)
4115,18 7/2 (0,15)
4128,07 3/2 (0,1)
4105,16 5/2 (0,16)
3703,57 7/2 (0,1)
3794,95 9/2 (5⁻²)
c²G 2,681
b²G 2,628
2,578
b⁴D
b²p
b²H 2,357
2,363
a²F 2,363
a⁴G 2,128
b⁴p
b⁴F 1,950
1,908
a⁴H 1,859
2,951
z²D°
2,894
z⁴F°
2,741
z⁴G°
2,586
z⁴D°
4352,87 9/2 (2⁻²)
4594,12 11/2 (2⁻²)
6243,11 9/2 (9⁻³)
z⁶D°
z⁶F°2,287
2,268
2,082
z⁶G°
6243,11 9/2 (9⁻³)
2,505
a⁶S
a²H 1,884
a²D
1,802
a²P 1,712
1,365
a²G
1,205
a⁴P
a⁴F
137,2
102,3
63,2
7/2
5/2
3/2
J=1/2
1,066
a⁴D
0,2847
a⁶D
9/2
7/2
5/2
3/2
J=1/2
113,4
91,2
66,9
40,9
9/2
7/2
5/2
J=1/2
229,5
186,1
137,4
Тонкое расщепление, см⁻¹
VI (3d³4s² − ⁴F3/2)

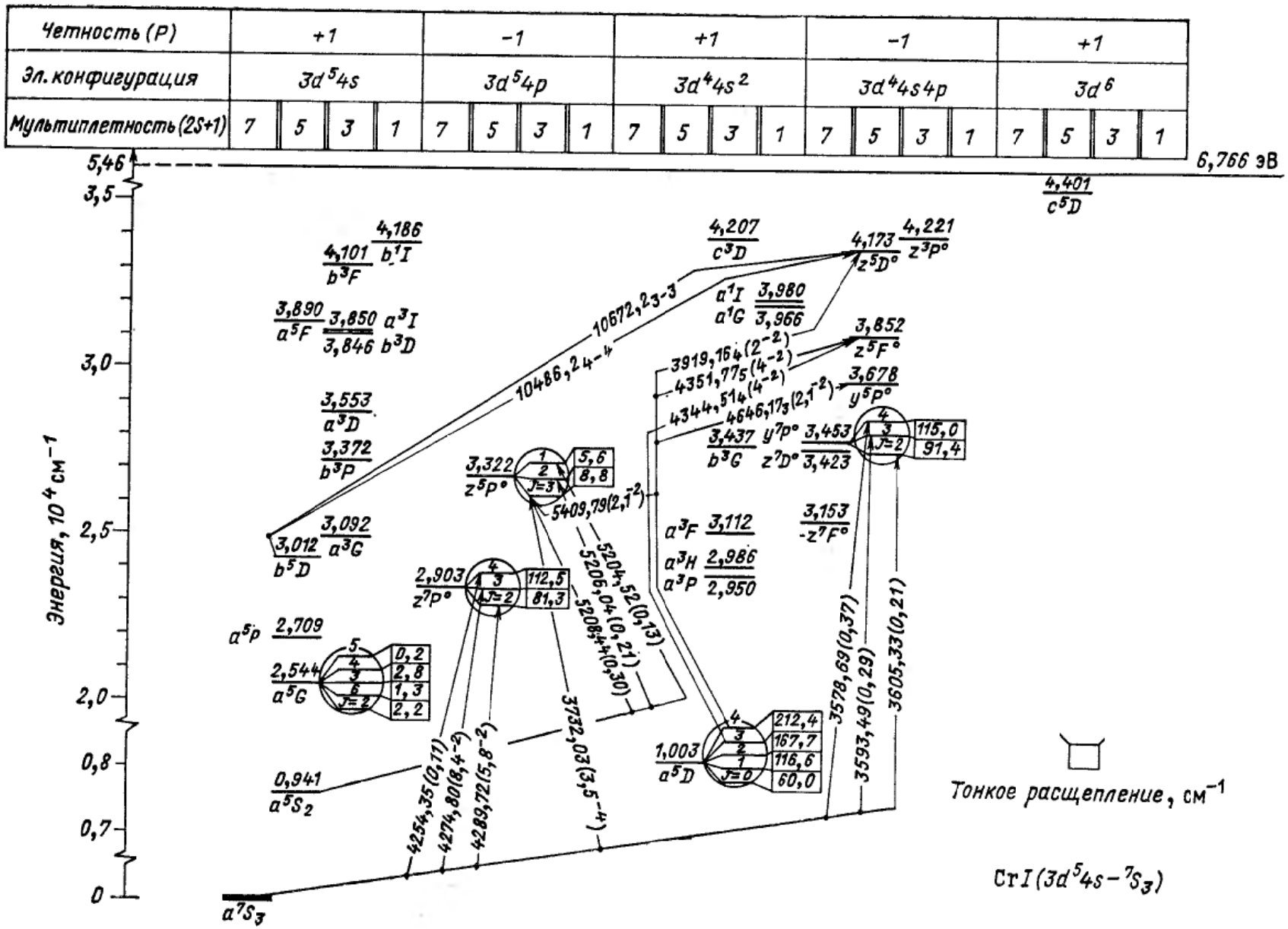


Рис. 32.25. Диаграмма Гротриана для атома хрома

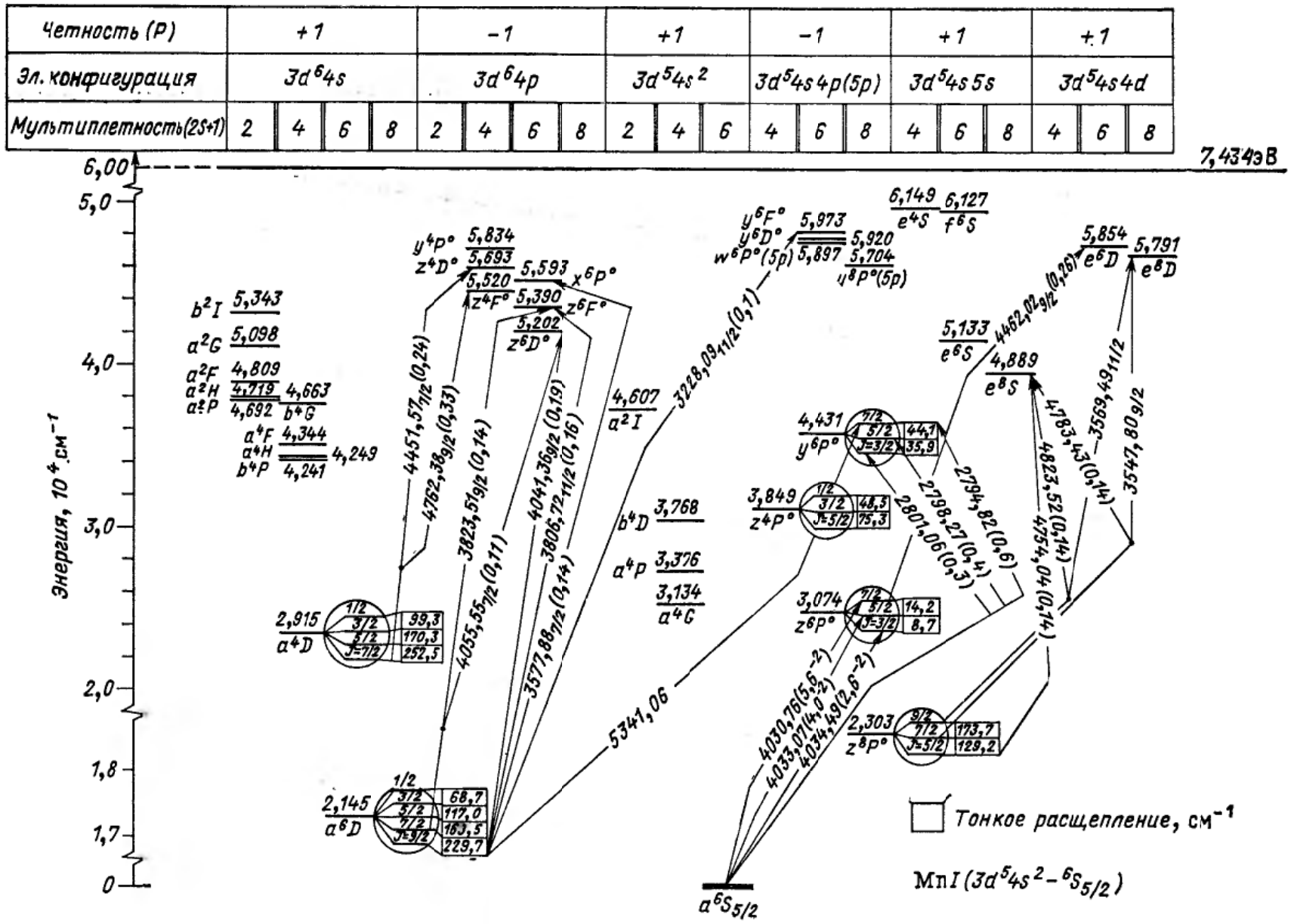


Рис. 32.26. Диаграмма Гротриана для атома марганца

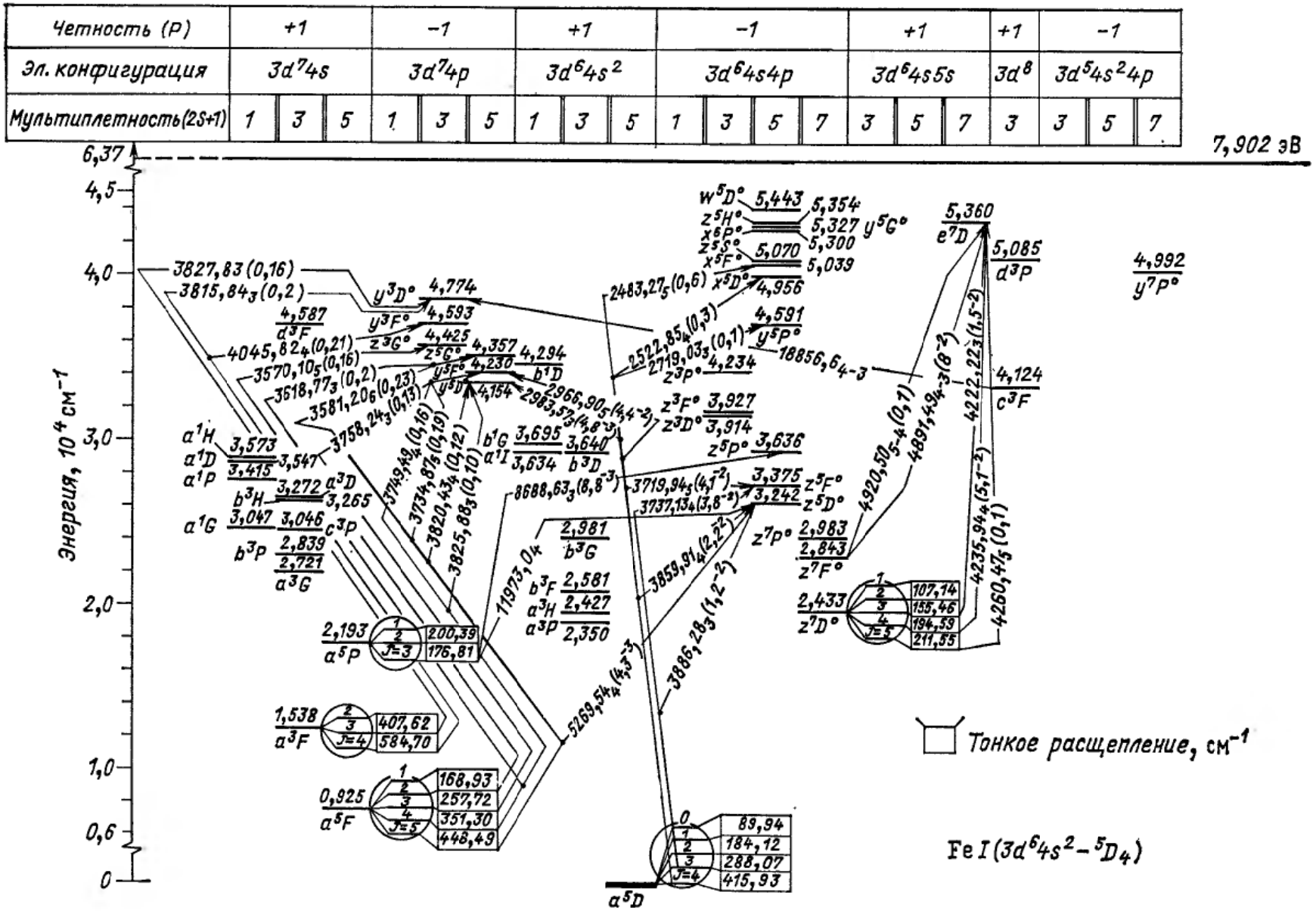


Рис. 32.27. Диаграмма Гротриана для атома железа

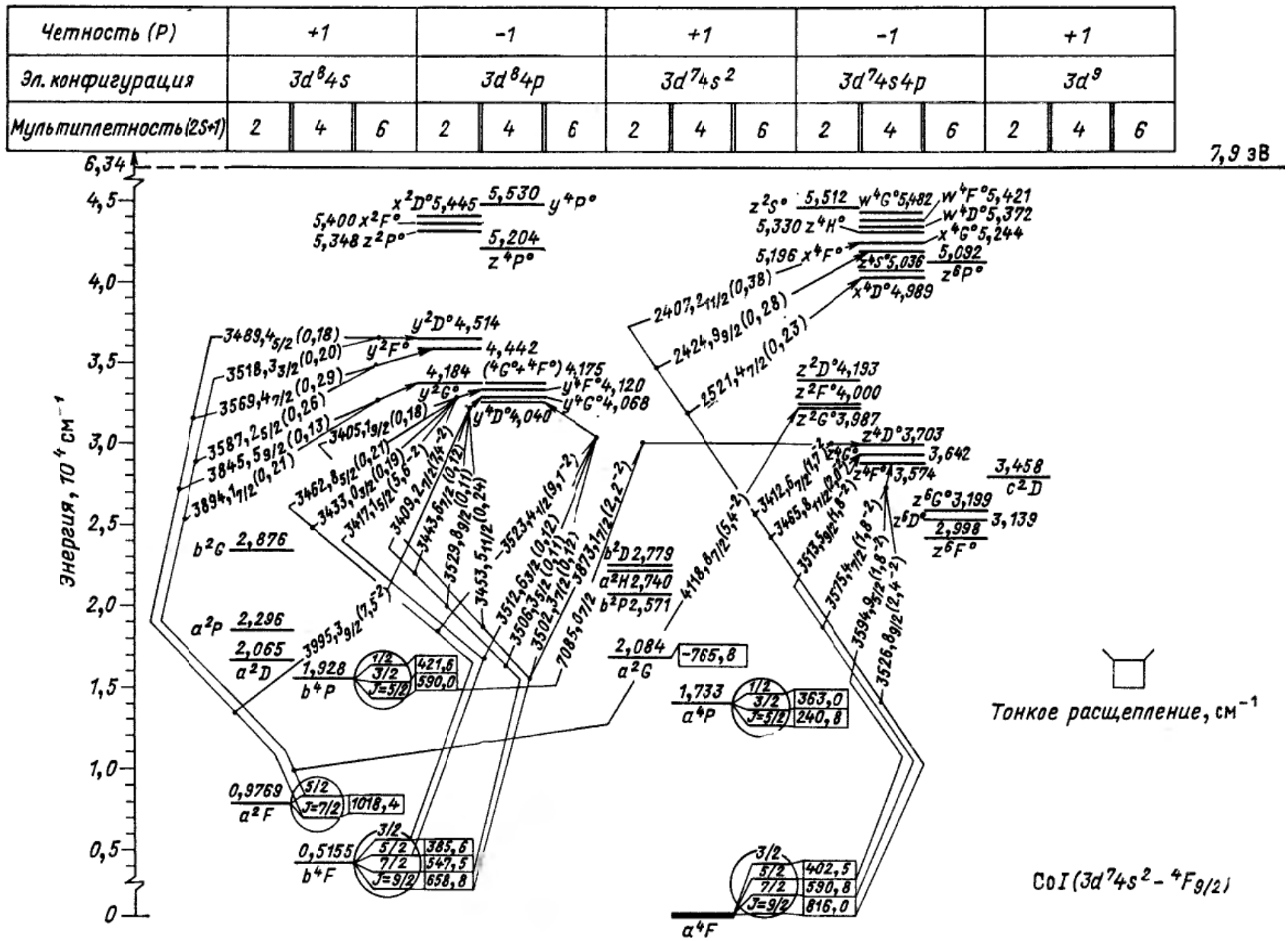


Рис. 32.28. Диаграмма Гротриана для атома кобальта

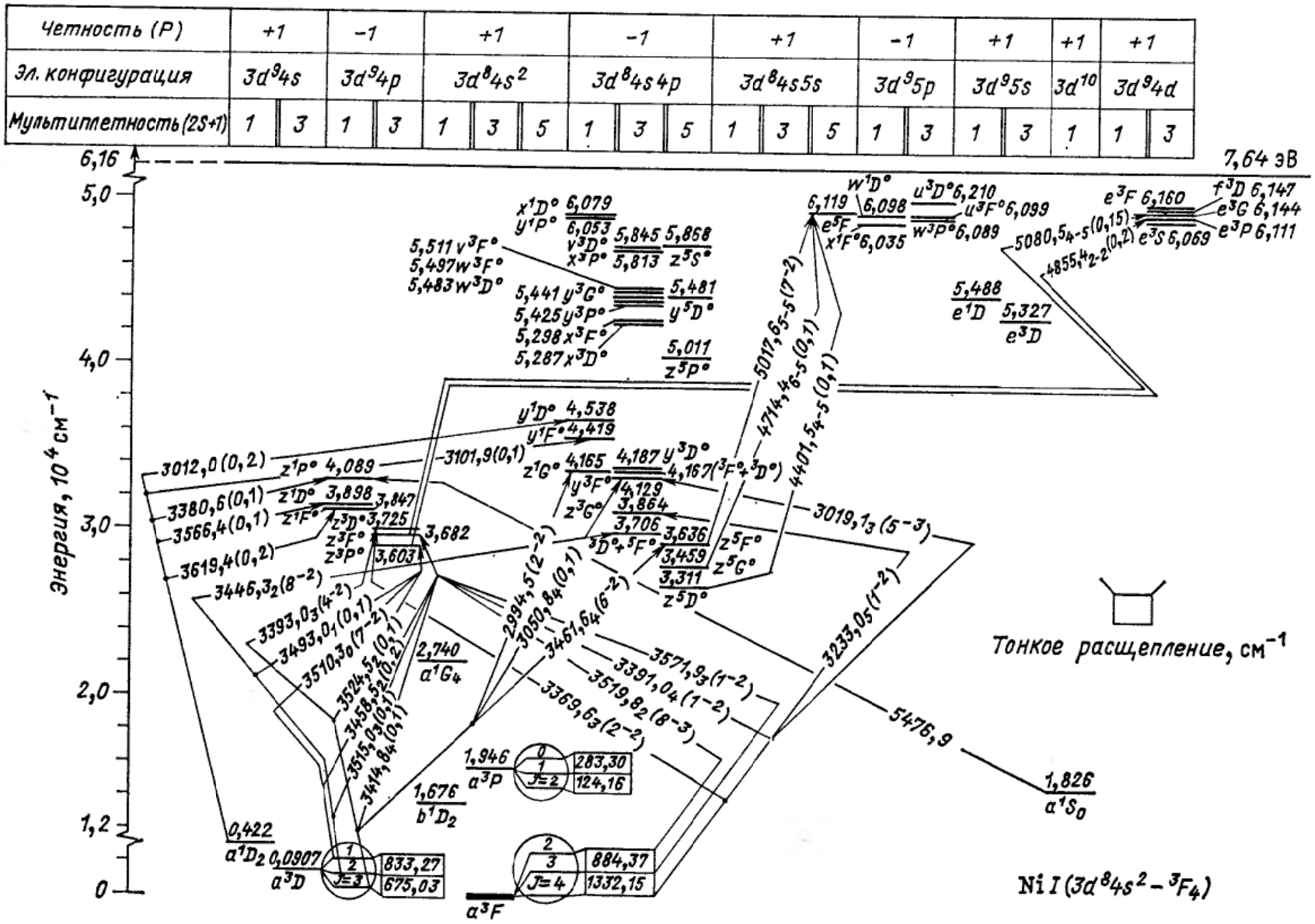


Рис. 32.29. Диаграмма Гротриана для атома никеля

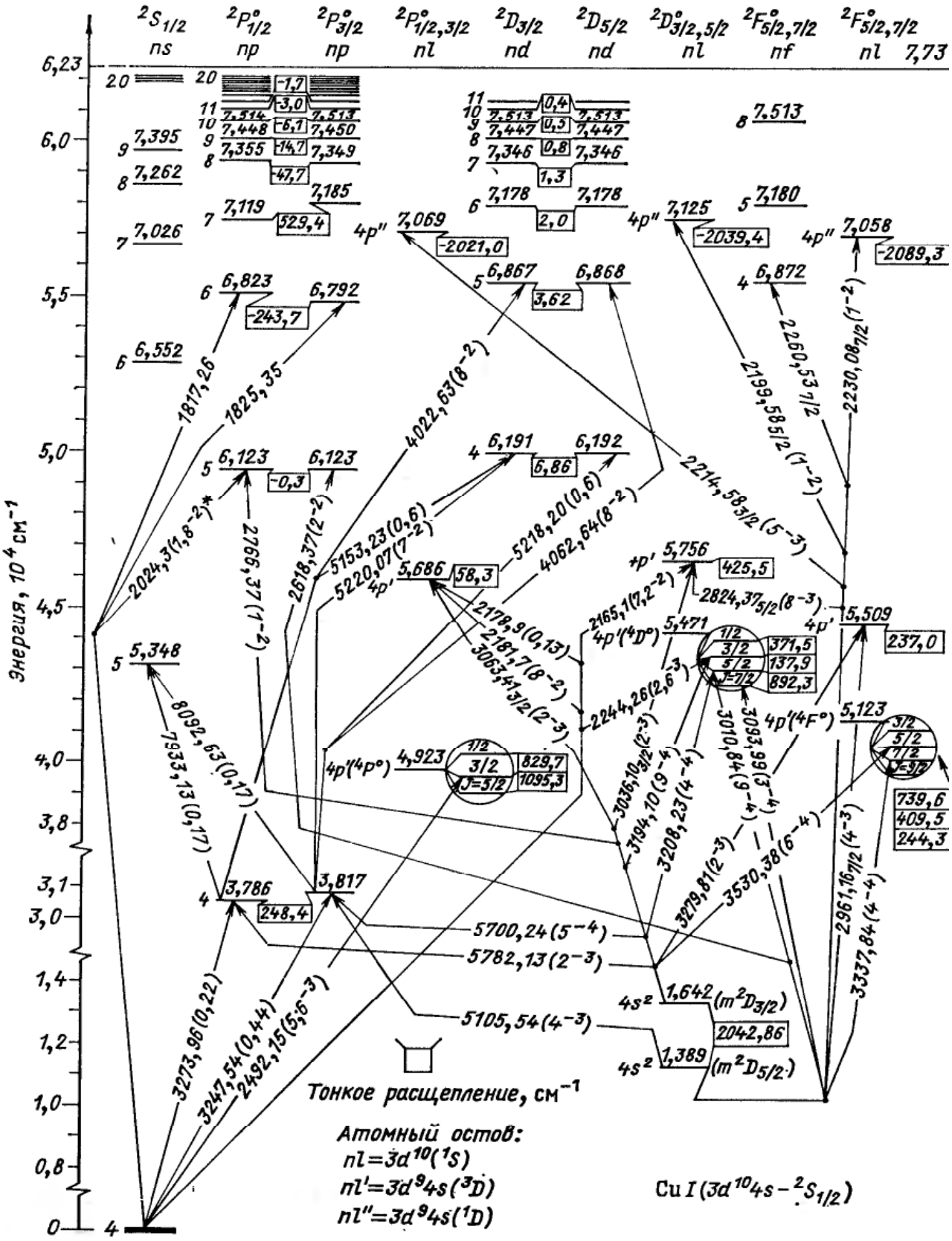


Рис. 32.30. Диаграмма Гротриана для атома меди

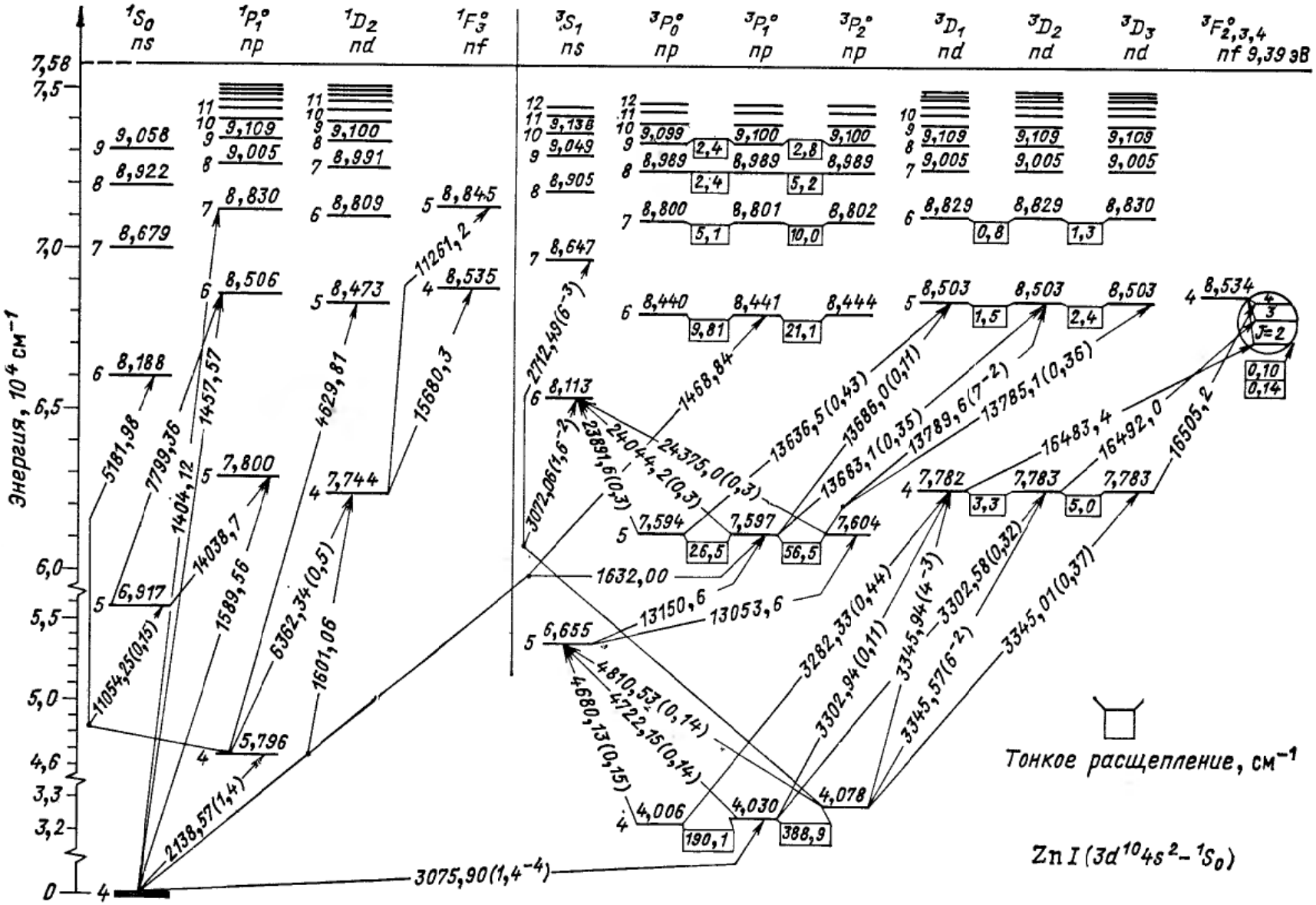


Рис. 32.31. Диаграмма Гротриана для атома цинка

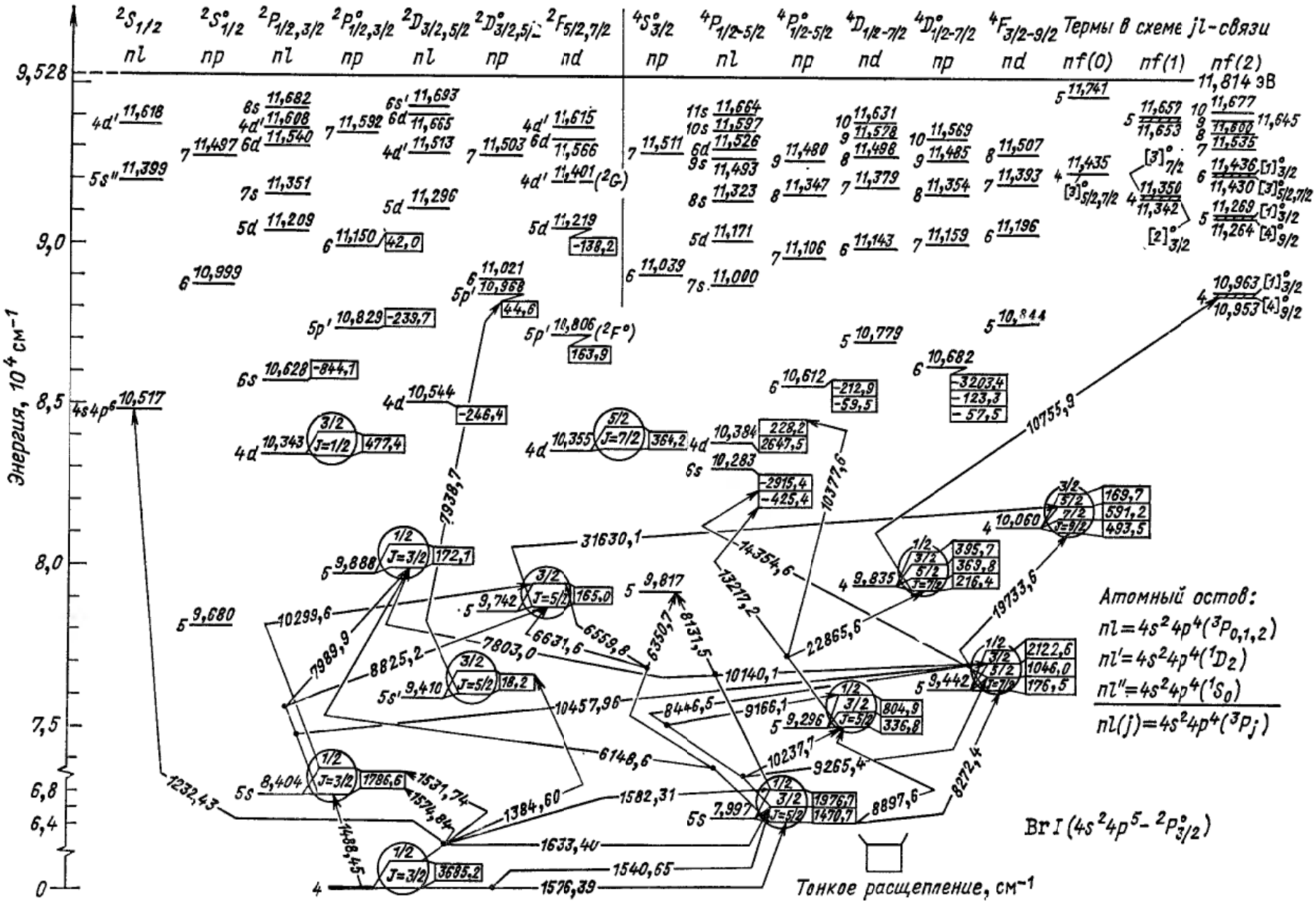


Рис. 32.32. Диаграмма Гротриана для атома брома

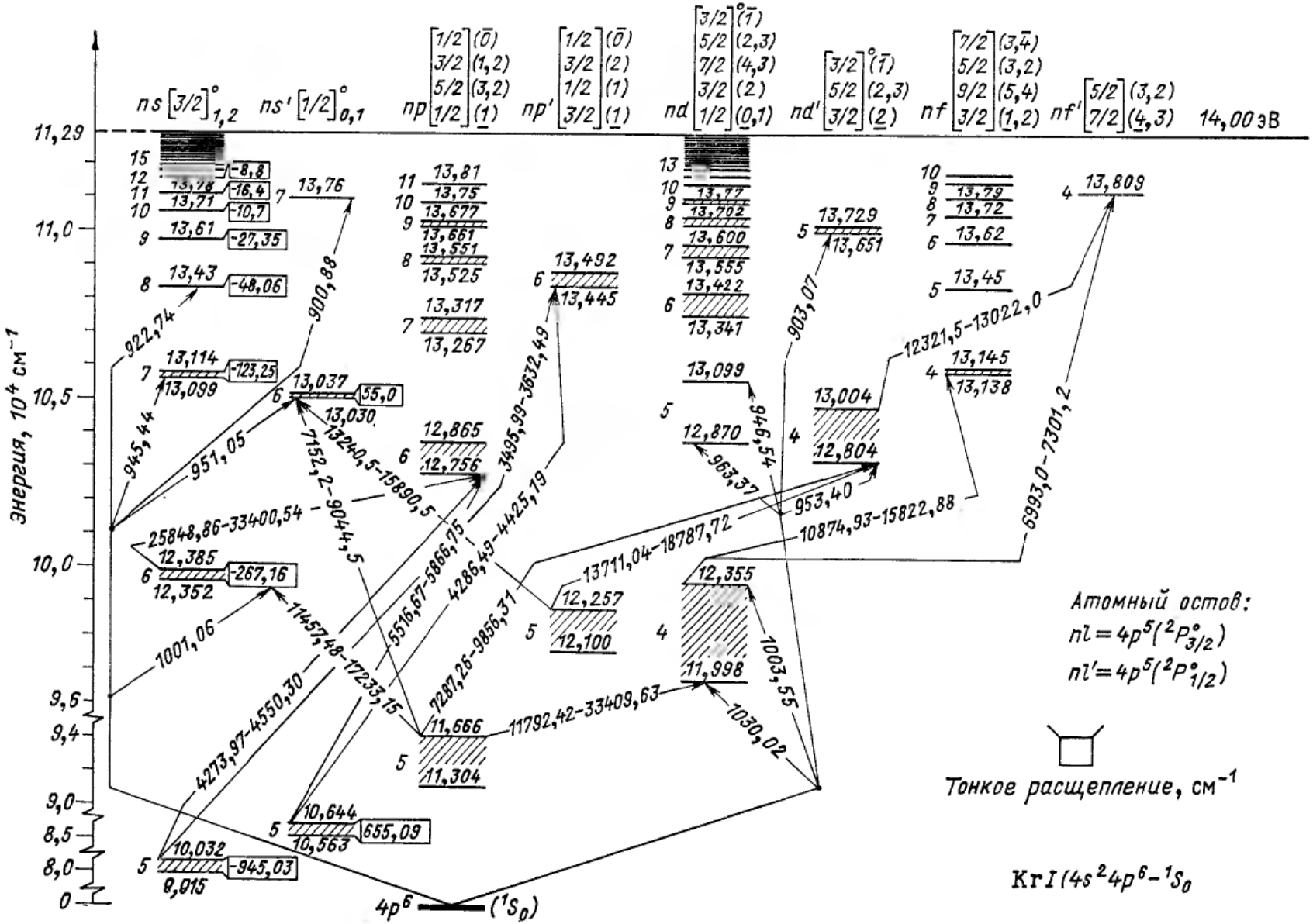


Рис. 32.33. Диаграмма Гротриана для атома криптоиа

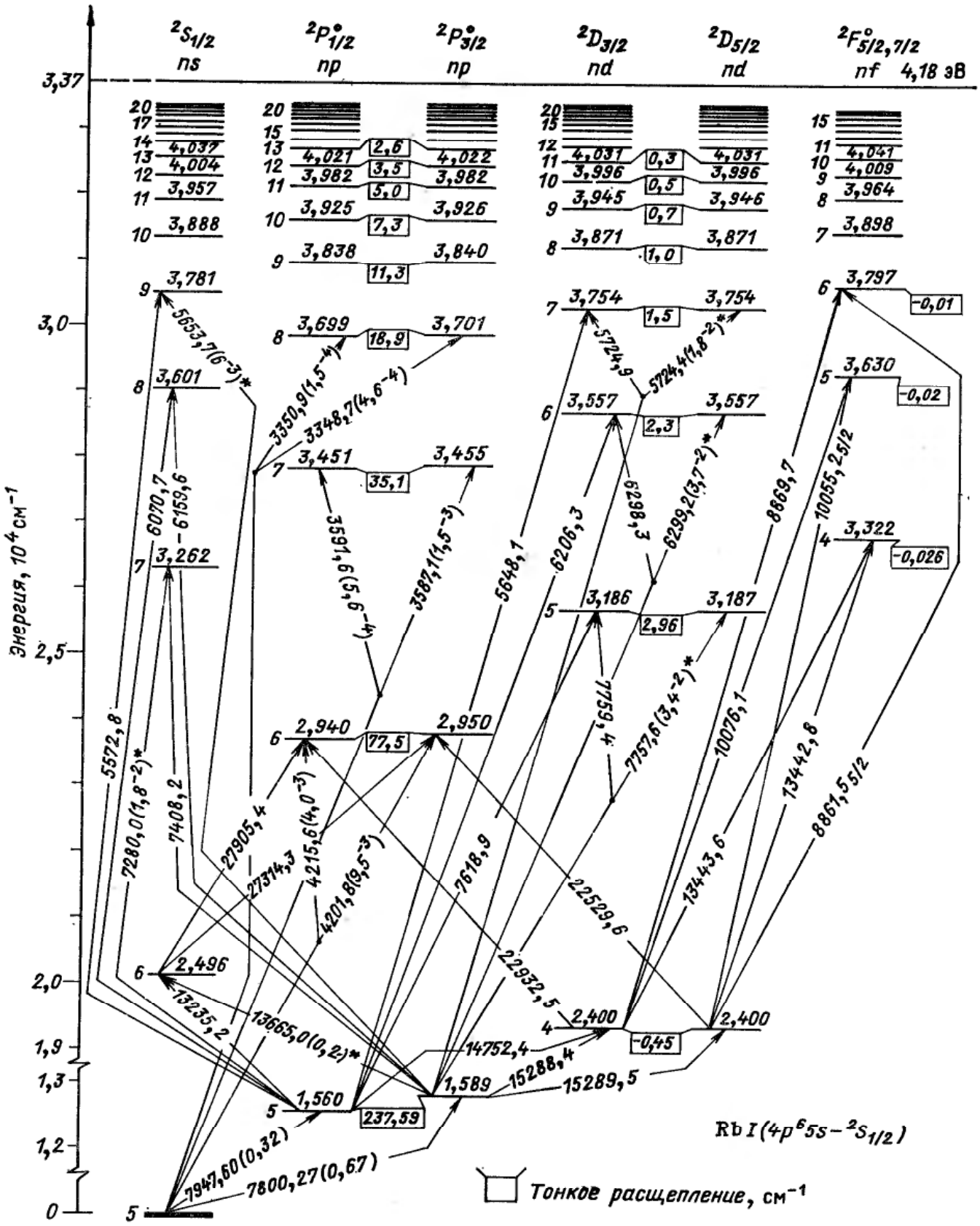


Рис. 32.34. Диаграмма Гротриана для атома рубидия

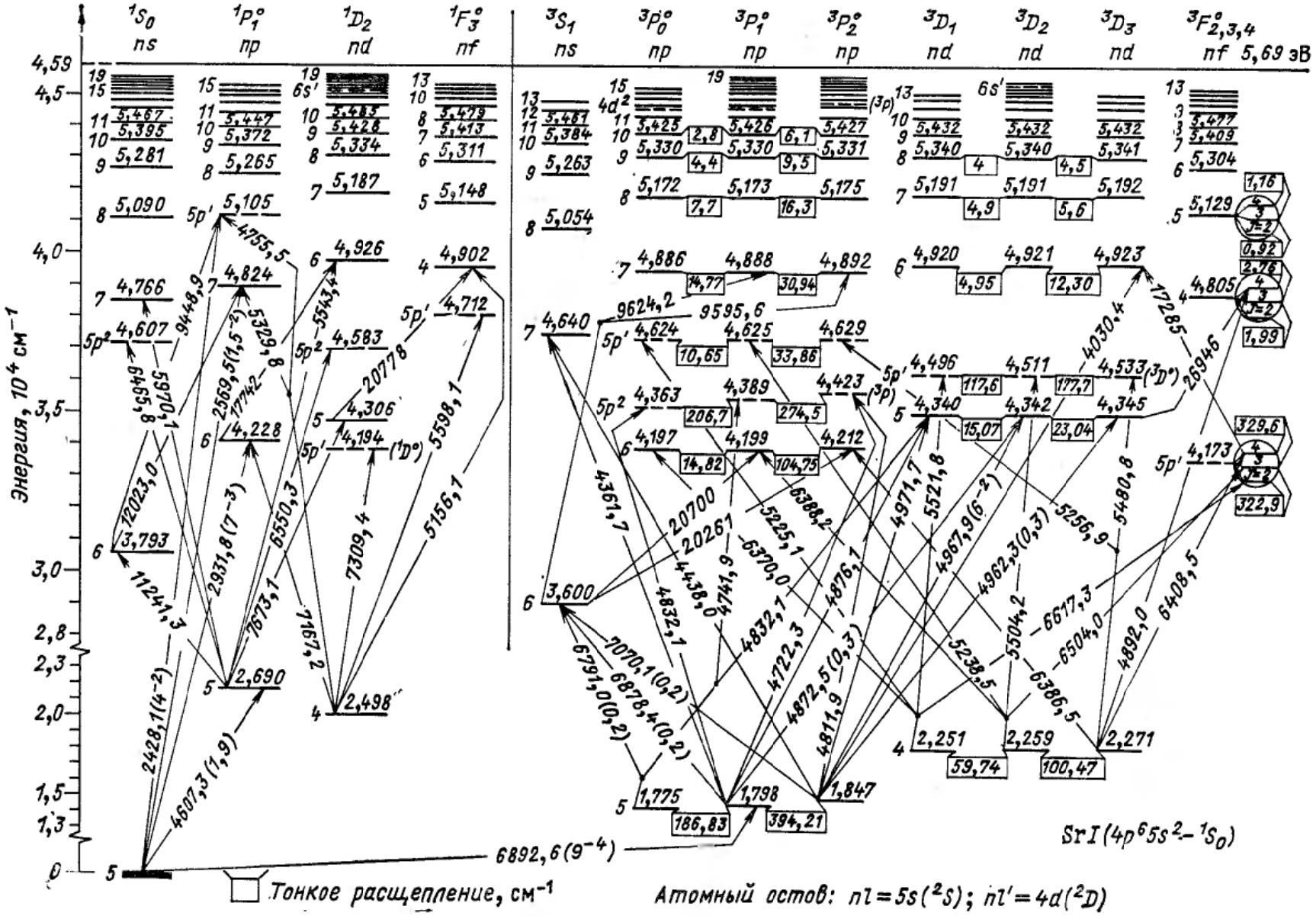


Рис. 32.35. Диаграмма Гротриана для атома стронция

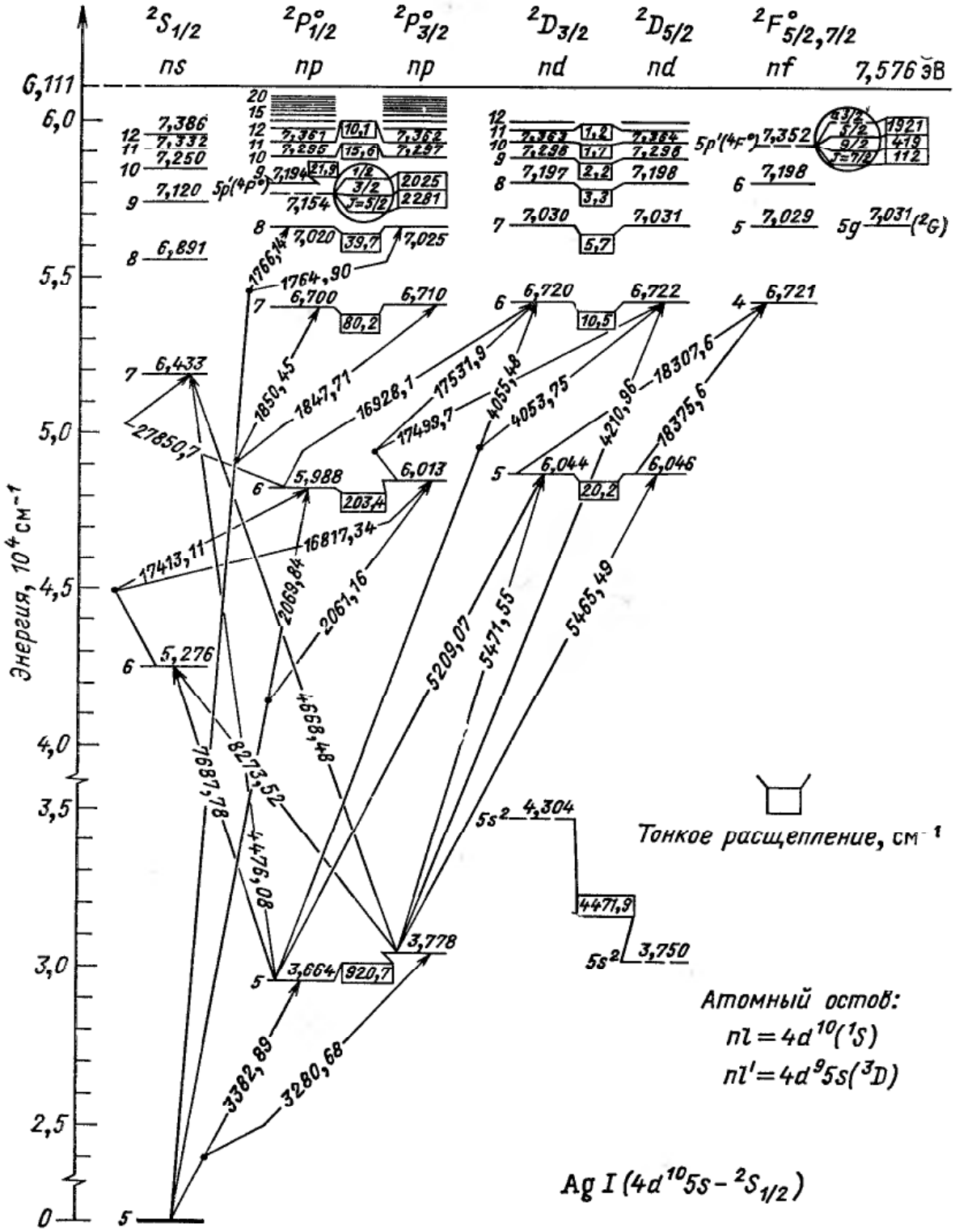


Рис. 32.36. Диаграмма Гротриана для атома серебра

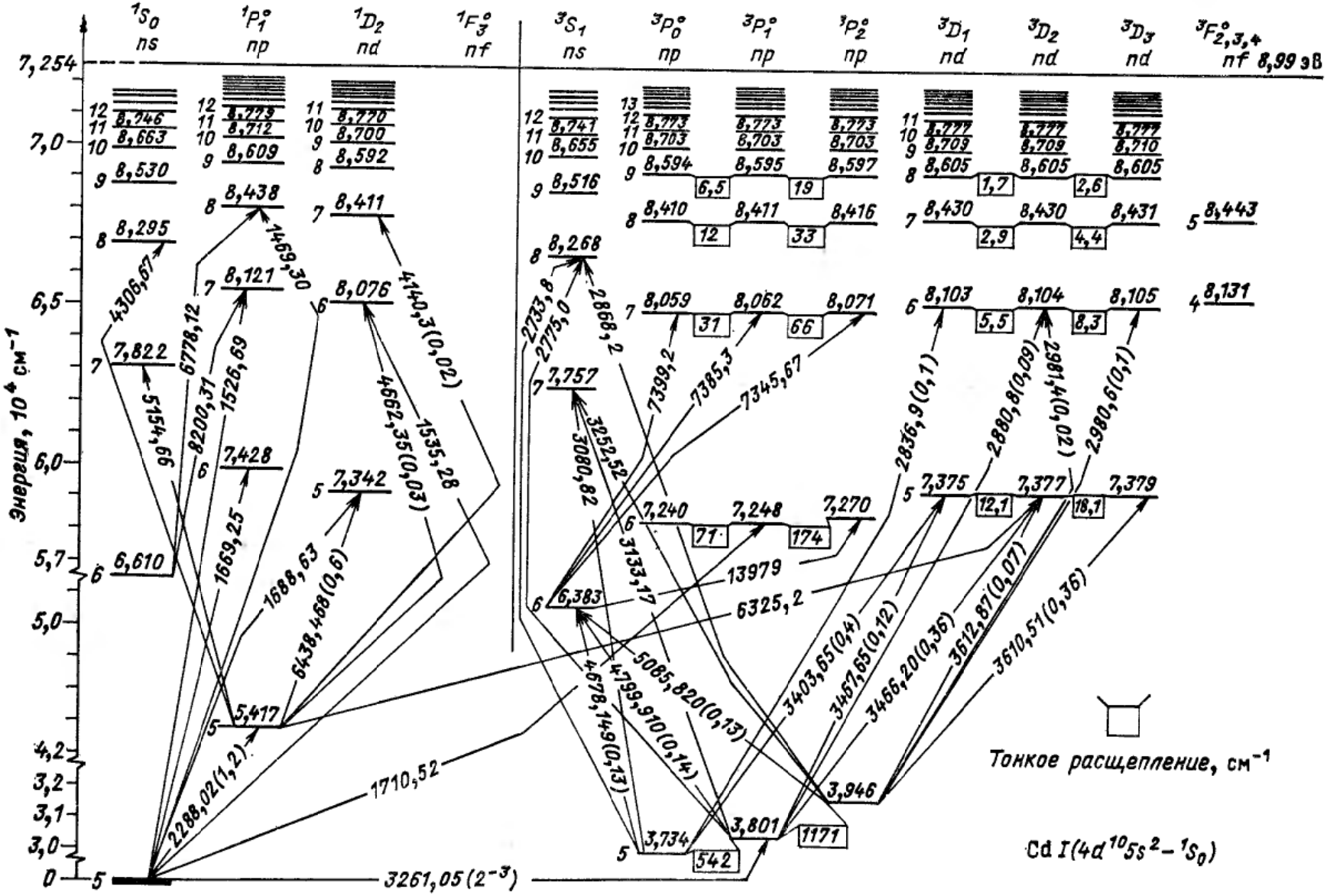


Рис. 32.37. Диаграмма Гротриана для атома кадмия

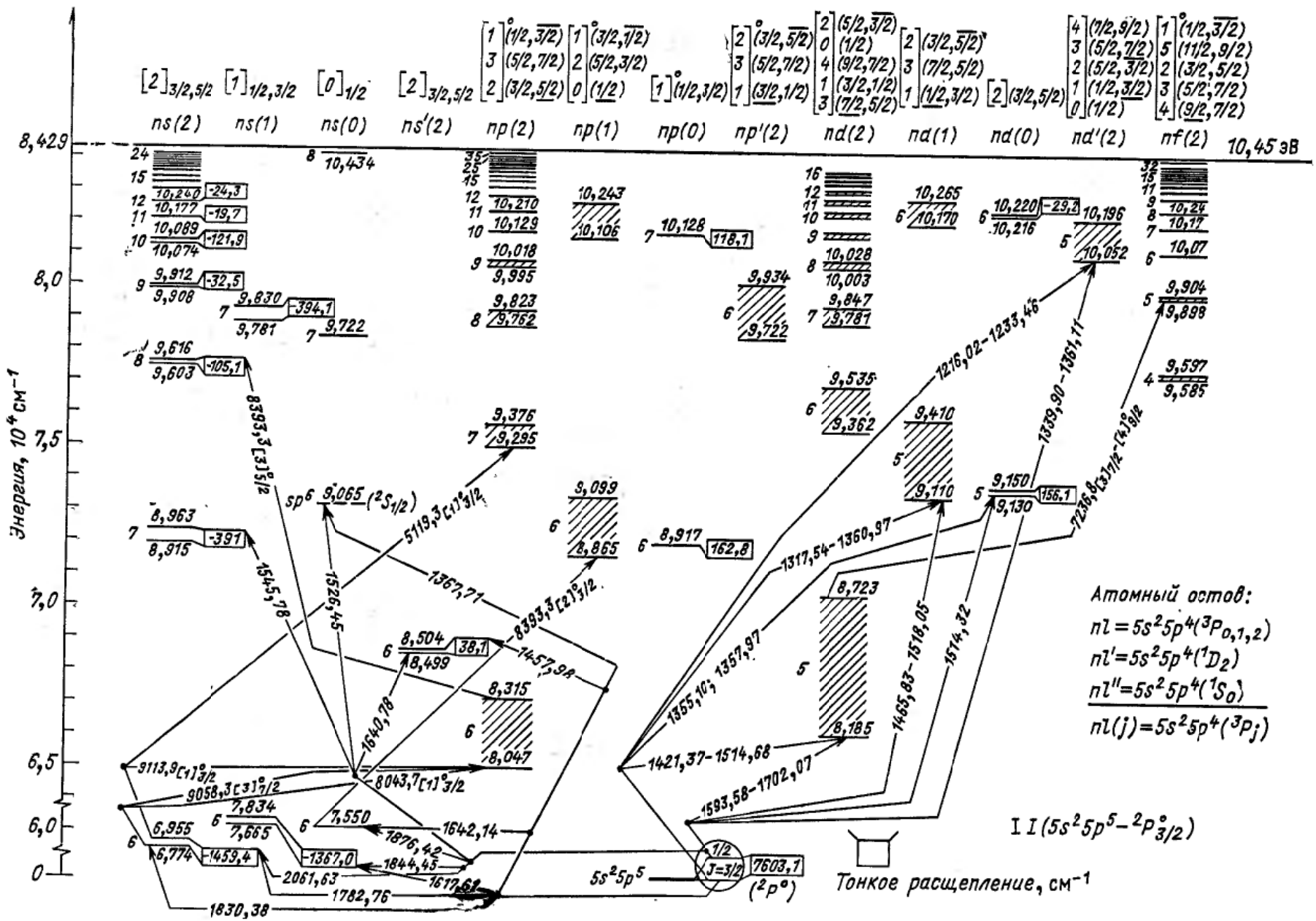


Рис. 32.38. Диаграмма Грэтриана для атома иода

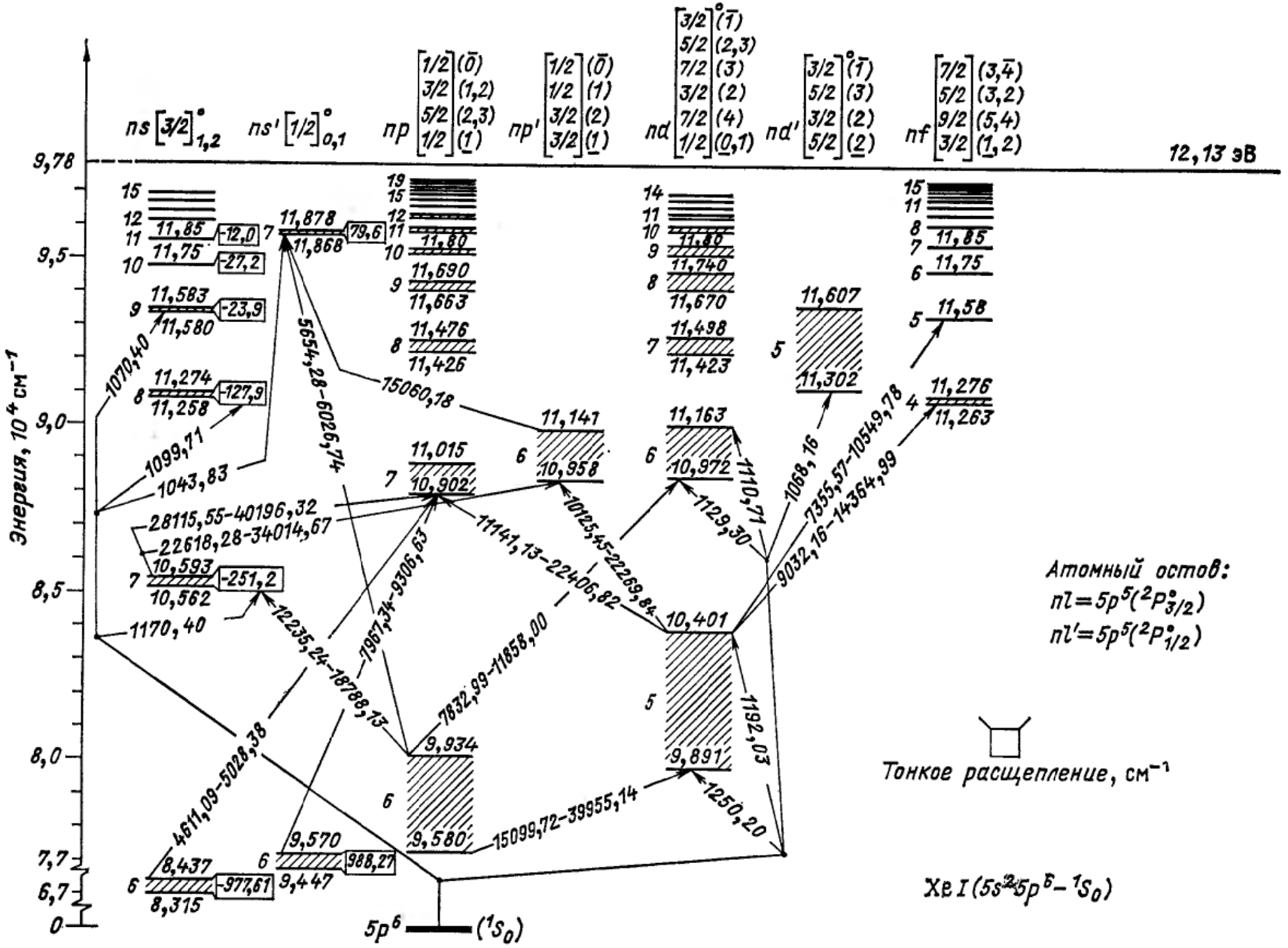


Рис. 32.39. Диаграмма Гротриана для атома ксенона

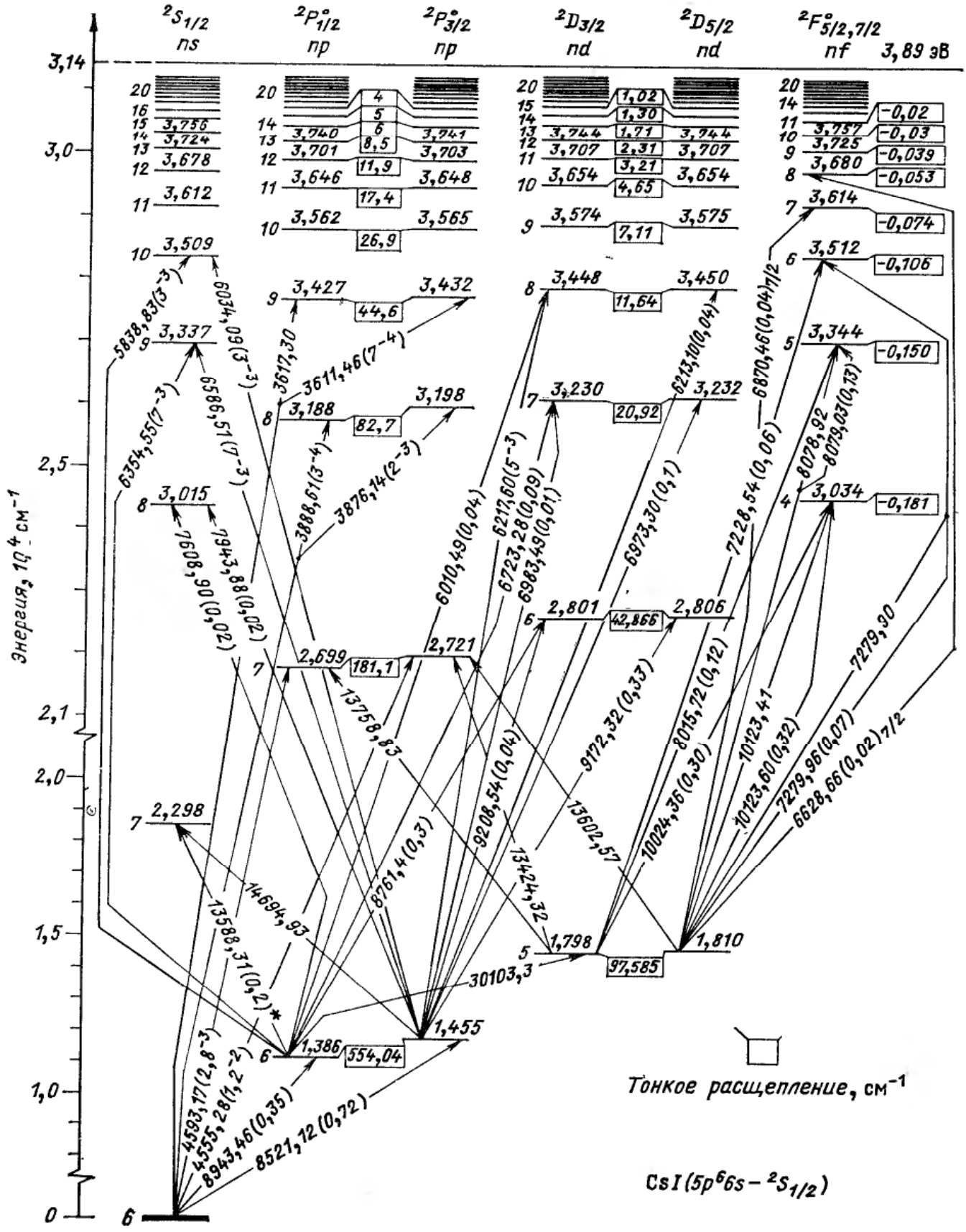


Рис. 32.40. Диаграмма Гротриана для атома цезия

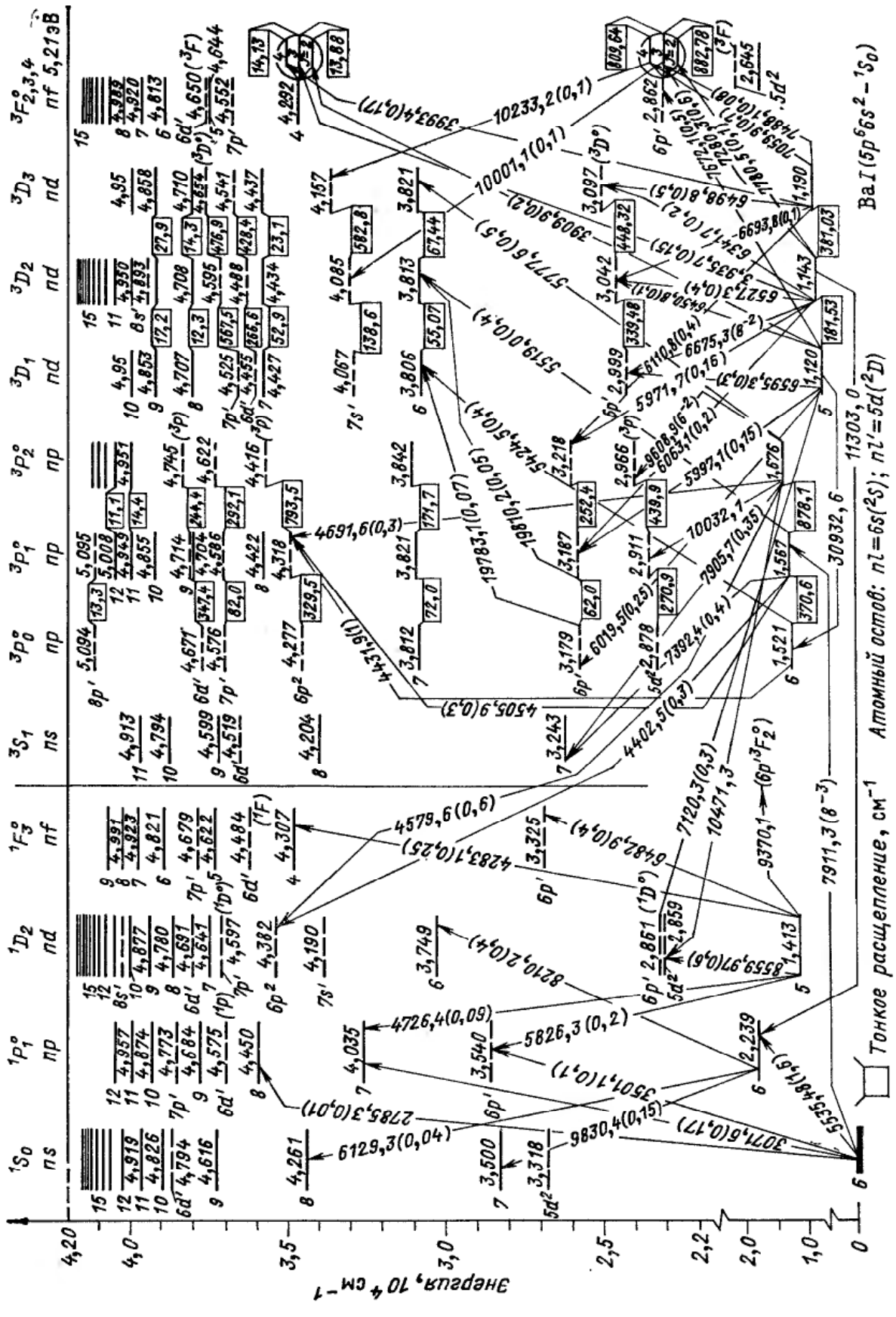


Рис. 32.41. Диаграмма Гротриана для атома бария

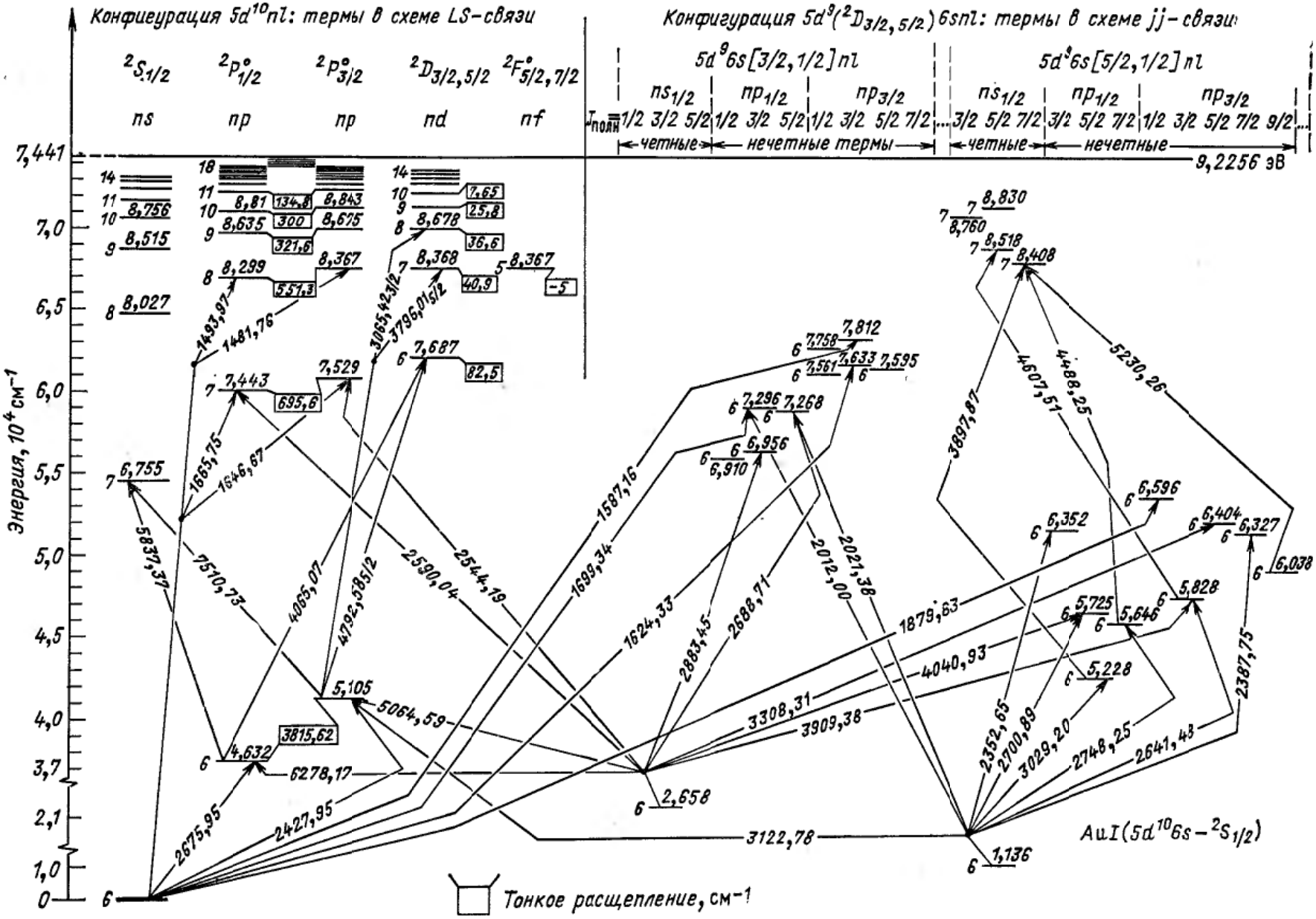


Рис. 32.42. Диаграмма Гротриана для атома золота

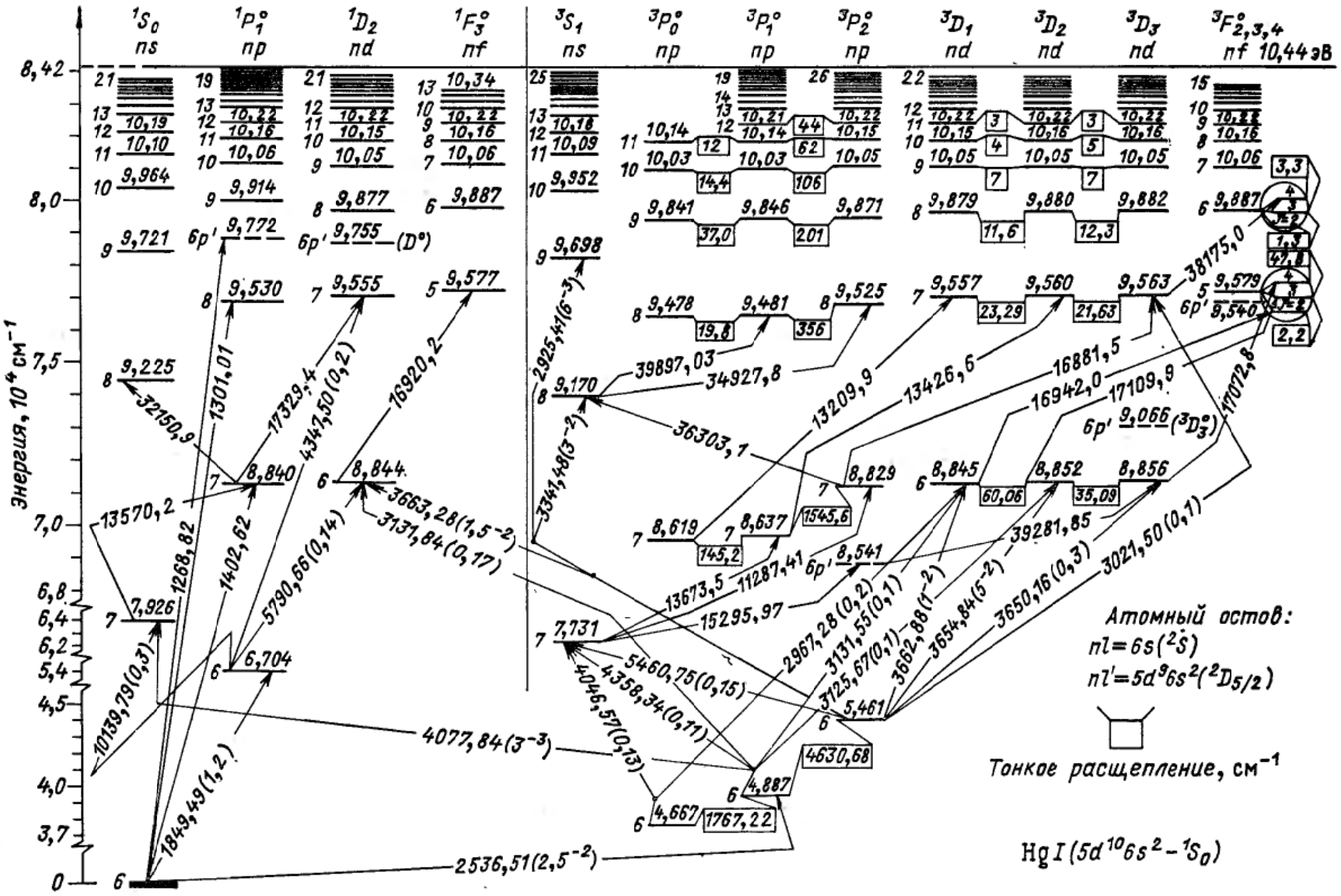


Рис. 32. 43. Диаграмма Гротриана для атома ртути

же диаграммами Гротриана) для первых 30 элементов таблицы Менделеева, ряда атомов с валентной электронной оболочкой вида ns, ns^2, np^5 и np^6 (n=5,6) и простейшего иона — He^+, интересных с точки зрения современных приложений атомной спектроскопии. Диаграммы дают наглядное представление о характере распределения возбужденных состояний по основным электронным конфигурациям атомов и содержат информацию о наиболее интенсивных переходах в их оптических спектрах.

При построении диаграмм Гротриана мы исключили из рассмотрения слишком высокие ридберговские уровни энергии и автоионизационные состояния, отвечающие двухэлектронному возбуждению и лежащие выше ионизационного предела атома. Положение атомных уровней энергии (под ними подразумевалось обычно положение центров тяжести мультиплетов $\overline{T}=\Sigma T_i g_i/\Sigma g_i$, где T_i — компонента мультиплета, g_i — статистический вес i-го подуровня) определяется по шкале ординат в обратных сантиметрах, кроме того, цифры над горизонтальными линиями уровней обозначают соответствующее значение энергии возбуждения в электрон-вольтах (1 эВ=8065, 54 $см^{-1}$).

Рядом с линиями уровней в прямоугольной рамке приведены значения энергии расщепления мультиплетных уровней с нужным знаком, характеризующим либо нормальный (+), либо обращенный (—) мультиплет. Штриховые метки использовались для обозначения электронных конфигураций, отвечающих разным исходным состояниям атомного остова. В случае атомов инертного газа и атома нода, у которых возбужденные состояния классифицируются по схеме jl-связи моментов, на диаграммах Гротриана были указаны только положения нижней и верхней компонент мультиплетных подуровней (отмеченных соответственно чертой снизу и сверху при символе квантового числа J полного момента атома) и граничные длины волн переходов между заданными мультиплетными уровнями.

В некоторых случаях рядом с числовым значением длины волны перехода λ (в ед. 10^{-10} м) приведены в круглых скобках значения соответствующей силы осцилляторов в поглощении f_{ik}. С помощью нижнего индекса у λ и f_{ik} отмечалось значение квантового числа J полного электронного момента состояния (нижнего, верхнего или обоих вместе), обладающего мультиплетной структурой.

При построении комбинированных диаграмм атомных уровней энергии и спектров на рис. 32.1—32.43 были использованы специальные руководства по диаграммам Гротриана [1, 2], многочисленные журнальные публикации по спектрам отдельных элементов [3], таблицы спектральных линий [4, 5] и справочные издания по вероятностям оптических переходов (см. литературу в [3]). Погрешности в определении величин T, $\Delta T_{ii'}$, λ и f_{ik} были учтены при округлении значащих цифр в пределах ± 1 для последней приведенной цифры.

Таблица 32.2. **Поправка $\Delta\lambda$, 10^{-10} м, к длине волны λ, 10^{-10} м, учитывающая дисперсию света в воздухе:** $\lambda_{возд}=\lambda_{вак}-\Delta\lambda$; $\lambda_{вак}=\lambda_{возд}+\Delta\lambda$

λ	$\Delta\lambda$	λ	$\Delta\lambda$	λ	$\Delta\lambda$
2000	0,648	3400	0,976	4800	1,34
2100	0,667	3500	1,00	4900	1,37
2200	0,687	3600	1,03	5000	1,39
2300	0,708	3700	1,05	5200	1,45
2400	0,731	3800	1,08	5400	1,50
2500	0,754	3900	1,10	5600	1,55
2600	0,777	4000	1,13	5800	1,61
2700	0,801	4100	1,16	6000	1,66
2800	0,825	4200	1,18	6200	1,72
2900	0,850	4300	1,21	6400	1,77
3000	0,875	4400	1,24	6600	1,82
3100	0,900	4500	1,26	6800	1,88
3200	0,925	4600	1,29	7000	1,93
3300	0,950	4700	1,32	7200	1,98

Продолжение табл. 32.2

λ	$\Delta\lambda$	λ	$\Delta\lambda$	λ	$\Delta\lambda$
7400	2,04	10 600	2,90	13 800	3,77
7600	2,09	10 800	2,96	14 000	3,83
7800	2,15	11 000	3,01	14 200	3,88
8000	2,20	11 200	3,07	14 400	3,94
8200	2,25	11 400	3,12	14 600	3,99
8400	2,31	11 600	3,18	14 800	4,05
8600	2,36	11 800	3,23	15 000	4,10
8800	2,42	12 000	3,28	16 000	4,37
9000	2,47	12 200	3,34	17 000	4,64
9200	2,52	12 400	3,39	18 000	4,92
9400	2,58	12 600	3,45	19 000	5,19
9600	2,63	12 800	3,50	20 000	5,46
9800	2,69	13 000	3,56	30 000	8,18
10 000	2,74	13 200	3,61	40 000	10,9
10 200	2,80	13 400	3,66	50 000	13,6
10 400	2,85	13 600	3,72	100 000	27,3

Стоит напомнить, что согласно принятому в спектроскопии соглашению все длины волн переходов с $\lambda>200$ нм относят к переходам в воздухе, а более короткие длины волн — к переходам в вакууме. В табл. 32.2 приведены значения поправки $\Delta\lambda$ к длине волны, учитывающей дисперсию света в воздухе по стандартной формуле Эдлена [3]:

$$\Delta\lambda=\lambda_{вак}-\lambda_{возд}=\lambda_{вак}(1-n^{-1}),$$

$$n=1+10^{-8}\left(8342{,}13+\frac{2{,}406030\cdot10^{-2}}{1{,}3\cdot10^{-6}-\sigma^2}+\frac{1{,}5997\cdot10^{-4}}{0{,}389\cdot10^{-6}-\sigma^2}\right),$$

здесь n — показатель преломления воздуха для рассматриваемой волны; σ — волновое число в вакууме, равное энергии перехода $\Delta T/h$, $см^{-1}$. В практических единицах связь между длиной волны перехода и энергией перехода имеет вид

$$\lambda_{вак}=10^8/\Delta T_1=12398{,}5/\Delta T_2,$$

где λ выражено в 10^{-10} м, ΔT_1 — в $см^{-1}$ и ΔT_2 — в эВ.

32.3. ТОНКАЯ СТРУКТУРА УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ АТОМОВ

Хорошо известно, что систематика уровней энергии и спектров многоэлектронных атомов строится на основе учета в модели самосогласованного (эффективного центрально-симметричного) поля атома дополнительных возмущений от нецентрального электростатического и релятивистских (спин-орбитального и спин-спинового) взаимодействий электронов. В нерелятивистском приближении при учете только электростатических взаимодействий энергетические уровни атома характеризуются значениями полного орбитального (L) и спинового (S) моментов электронов и вырожде-

ны по возможным направлениям векторов **L** и **S** в пространстве.

Если учесть зависящие от спинов электронов релятивистские взаимодействия, то, строго говоря, уровни энергии атома должны характеризоваться лишь значениями сохраняющегося полного электронного момента **J**=**L**+**S**, поскольку каждый из моментов **L** и **S** в отдельности не сохраняется. При относительной малости релятивистских эффектов по сравнению с электростатическим взаимодействием электронов их можно рассматривать по теории возмущений и тогда уровень энергии с заданными значениями LS расщепляется на ряд компонент, отличающихся значениями квантового числа $J(|L-S| \leqslant J \leqslant L+S)$. Так возникает тонкая структура уровней — каждый уровень характеризуется набором квантовых чисел LSJ.

Если принять во внимание взаимодействие орбитальных и спиновых моментов электронов, то интервалы между соседними компонентами расщепленного уровня, которым отвечают значения полного электронного момента J и $J-1$, можно представить в виде [6]:

$$\Delta E_J - \Delta E_{J-1} = AJ,$$

где A — постоянная спин-орбитального взаимодействия, зависящая от электронной конфигурации и от L и S. Этой формулой выражается правило интервалов Ланде в приближении LS-связи моментов, когда интервалы тонкой структуры малы по сравнению с разностями энергий уровней с различными L, S. Постоянная A может быть как положительной, так и отрицательной, и в соответствии с этим заданный мультиплет называют либо нормальным (его нижней компоненте отвечает минимальное значение $J=|L-S|$), либо обращенным (нижней компоненте отвечает максимальное значение $J=L+S$).

Измеренные значения энергии расщепления $\Delta E_{J,J-1}$ соседних компонент низколежащих мультиплетов атомов приведены на рис. 32.1—32.43. Как правило, приближение LS-связи подходит для описания не слишком сильно возбужденных уровней энергии атомов из начала и середины таблицы Менделеева. Погрешности определения энергии тонкого расщепления уровней были учтены при округлении значащих цифр в пределах ±1 для последней цифры.

32.4. СВЕРХТОНКАЯ СТРУКТУРА УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ АТОМОВ

Взаимодействие атомных электронов с мультипольными моментами ядра (магнитными и электрическими) приводит к расщеплению уровней энергии, характеризуемых полным электронным моментом J, на ряд сверхтонких компонент. Каждая такая компонента определяется набором из четырех квантовых чисел J, I, F, m_F, где I — спин ядра, $\mathbf{F}=\mathbf{J}+\mathbf{I}$ — полный угловой момент атома $(|J-I| \leqslant F \leqslant J+I)$, m_F — проекция полного момента на выделенное направление в пространстве.

Основную роль в сверхтонком расщеплении уровней играет взаимодействие электронов с мультипольными моментами ядра наинизших порядков — магнитным дипольным и электрическим квадрупольным моментами. В первом приближении моменты J и I можно считать сохраняющимися и тогда полная энергия уровня записывается в виде суммы [7]:

$$E_F = E_J + E_{M1} + E_{E2} = E_J + \frac{h}{2} AK + \frac{3h}{8} B \frac{K(K+1) - \frac{4}{3} I(I+1) J(J+1)}{I(2I-1) J(2J-1)}; \quad I, J \geqslant 1,$$

где E_J — энергия уровня без учета взаимодействия электронов с ядерными моментами; E_{M1} — энергия взаимодействия электронов с магнитным дипольным моментом ядра; E_{E2} — энергия взаимодействия электронов с электрическим квадрупольным моментом ядра. Далее, величина $K=F(F+1)-I(I+1)-J(J+1)$ и, наконец, A, B — параметры сверхтонкого расщепления уровней, причем магнитное взаимодействие всегда превышает квадрупольное. Для состояний с электронным моментом $J \leqslant 1/2$ (вследствие сферической симметрии в распределении электронного заряда) константа квадрупольного взаимодействия B обращается в нуль.

Сверхтонкое расщепление уровней принято обозначать в виде $\Delta\nu(F, F') = \Delta E_{FF'}/h$, где $\Delta E_{FF'}$ — расстояние между соседними компонентами с полными моментами F и $F'=F-1$, измеренное в отсутствие внешнего магнитного поля. Зависимость величины $\Delta\nu$ от параметров сверхтонкого расщепления A и B имеет вид

$$\Delta\nu(F, F') = AF + \frac{3BF(F^2+1/2)}{I(2I-1) J(2J-1)}; \quad I, J \geqslant 1.$$

В табл. 32.3 представлены измеренные значения энергии сверхтонкого расщепления $\Delta\nu(F, F')$, а также значения параметров A, B для ряда слабовозбужденных уровней атомов [3, 7—9]. Погрешности в определении искомых величин сверхтонкого расщепления уровней были учтены нами при округлении значащих цифр в пределах ±1 для последней приведенной цифры.

Таблица 32.3. **Сверхтонкое расщепление низколежащих уровней атомов**

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра I	Терм	Квантовые числа полного момента (F, F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu(F, F')$, A, B, МГц	ΔE (F, F'), 10^{-3} см$^{-1}$
1	^1H ($^2S_{1/2}$), 1/2	$1\,^2S_{1/2}$	(1,0)	1420,40575	47,3796
		$2\,^2S_{1/2}$	(1,0)	177,5568	5,92266
	^2H ($^2S_{1/2}$), 1	$1\,^2S_{1/2}$	(3/2,1/2)	327,38435	10,9204
		$2\,^2S_{1/2}$	(3/2,1/2)	40,9244	1,36509
	^3H ($^2S_{1/2}$), 1/2	$1\,^2S_{1/2}$	(1,0)	1516,70147	50,5917

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра I	Терм	Квантовые числа полного момента (F, F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu(F,F')$, A, B, МГц	$\Delta E(F, F')$, 10^{-3} см$^{-1}$
2	^{3}He($^1S_0$), 1/2	$2\,^3S_1$	(3/2, 1/2)	6739,701	224,812
		$2\,^3P_2$	(5/2, 3/2)	6960	232,2
		$2\,^3P_1$	(3/2, 1/2)	4510	151
	^{3}He$^+$($^2S_{1/2}$), 1/2	$1\,^2S_{1/2}$	(1,0)	8665,6499	289,055
3	^{6}Li($^2S_{1/2}$), 1	$2\,^2S_{1/2}$	(3/2, 1/2)	228,20526	7,61211
		$2\,^2P_{1/2}$	—	A = 17,37	—
		$2\,^2P_{3/2}$	—	A = —1,16	—
				B = —0,1	
	^{7}Li($^2S_{1/2}$), 3/2	$2\,^2S_{1/2}$	(2,1)	803,50409	26,80203
		$2\,^2P_{1/2}$	—	A=45,9	—
		$2\,^2P_{3/2}$	—	A=—3,06	—
				B=—0,2	
4	^{9}Be($^1S_0$), 3/2	$2\,^3P_1$	(5/2, 3/2)	354,44	11,823
			(3/2, 1/2)	202,95	6,7697
		$2\,^3P_2$	(7/2, 5/2)	435,48	14,526
			(5/2, 3/2)	312,02	10,408
			(3/2, 1/2)	187,62	6,2583
5	^{10}B ($^2P_{1/2}$), 3	$2\,^2P_{1/2}$	(7/2, 5/2)	429,05	14,312
	^{11}B ($^2P_{1/2}$), 3/2	$2\,^2P_{1/2}$	(2,1)	732,15	24,422
		$2\,^2P_{3/2}$	(3,2)	222,7	7,428
			(2,1)	144,0	4,803
			(1,0)	71	2,37
6	^{13}C($^3P_0$), 1/2	$2\,^3P_1$	(3/2, 1/2)	4,3	0,14
		$2\,^3P_2$	(5/2, 3/2)	372,6	12,43
7	^{14}N ($^4S_{3/2}$), 1	$2\,^4S_{3/2}$	—	A=10,45093	—
				B=1,3	
8	^{17}O($^3P_2$), 5/2	$2\,^3P_2$	—	A=—219,6	—
		$2\,^3P_1$	—	A=4,7	—
9	^{19}F($^2P_{3/2}$), 1/2	$2\,^2P_{3/2}$	(2,1)	4020	134
		$2\,^2P_{1/2}$	(1,0)	10250	342
10	^{21}Ne($^1S_0$), 3/2	$3\,^3P_2$	(7/2, 5/2)	1034,5	34,51
			(5/2, 3/2)	599,4	19,99
			(3/2, 1/2)	303,9	10,14
11	^{23}Na($^2S_{1/2}$), 3/2	$3\,^2S_{1/2}$	(2,1)	1771,62613	59,09513
		$3\,^6P_{1/2}$	—	A=94,3	—
		$3\,^2P_{3/2}$	—	A=18,7	—
				B=2,9	—
12	^{25}Mg($^1S_0$), 5/2	$3\,^3P_1$	(7/2, 5/2)	516,1	17,22
			(5/2, 3/2)	350,0	11,7
		$3\,^3P_2$	(9/2, 7/2)	567,3	18,92
			(7/2, 5/2)	452,3	15,09
			(5/2, 3/2)	329,0	10,97
			(3/2, 1/2)	199,8	6,66
13	^{27}Al($^2P_{1/2}$), 5/2	$3\,^2P_{1/2}$	(3,2)	1506,1	50,24
		$3\,^2P_{3/2}$	(4,3)	392	13,1
			(3,2)	274	9,14
		$4\,^2S_{1/2}$	—	A=420	—
15	^{31}P ($^4S_{3/2}$), 1/2	$3\,^4S_{3/2}$	—	A=55,06	—
17	^{35}Cl ($^2P_{3/2}$), 3/2	$3\,^2P_{3/2}$	(3,2)	670,0135	22,349
			(2,1)	355,2210	11,849
			(1,0)	150,1736	5,009
		$3\,^2P_{1/2}$	(2,1)	2074,38	69,19
	^{37}Cl ($^2P_{3/2}$,) 3/2	$3\,^2P_{3/2}$	(3,2)	555,3043	18,523
			(2,1)	298,1277	9,944
			(1,0)	127,4408	4,251
		$3\,^2P_{1/2}$	(2,1)	1726,7	57,60

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра I	Терм	Квантовые числа полного момента (F, F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu(F, F')$, A, B, МГц	$\Delta E(F, F')$, 10^{-3} см$^{-1}$
19	^{39}K ($^2S_{1/2}$), 3/2	$4\,^2S_{1/2}$	(2,1)	461,71972	15,40132
		$4\,^2P_{1/2}$	—	A=27,8	—
		$4\,^2P_{3/2}$	—	A=6,1 B=2,8	—
		$4\,^2S_{1/2}$	—	A=—285,73	
	^{40}K ($^2S_{1/2}$), 4	$4\,^2P_{1/2}$	—	A=—34,5	—
		$4\,^2P_{3/2}$	—	A=—7,5 B=—3	—
	^{41}K ($^2S_{1/2}$), 3/2	$4\,^2S_{1/2}$	(2,1)	254,01387	8,47300
		$4\,^2P_{1/2}$	—	A = 15,2	—
		$4\,^2P_{3/2}$	—	A = 3,4 B = 3,3	—
20	^{41}Ca ($^1S_0$), 7/2	$4\,^3P_1$	—	A = —240.7 B = 4	—
	^{43}Ca ($^1S_0$), 7/2	$4\,^3P_1$	—	A = —198,8 B = 3	—
21	^{45}Sc ($^2D_{3/2}$), 7/2	$3\,^2D_{3/2}$	(5,4) (4,3)	1329 1085,8	44,3 36,22
		$3\,^2D_{5/2}$	(6,5) (5,4) (4,3)	635,0 543,8 444,7	21,18 18,14 14,83
		$4\,^4F_{3/2}$	—	A = 158,5 B = —5,2	—
		$4\,^4F_{5/2}$	—	A = 154,0 B = —6,5	—
		$4\,^4F_{7/2}$	—	A = 250,0 B = —9,1	—
		$4\,^4F_{9/2}$	—	A = 286,0 B = — 15	—
22	^{47}Ti ($^3F_2$), 5/2	$3\,^3F_2$	—	A = —85,703 B = 25,70	—
	^{49}Ti ($^5F_2$), 7/2	$3\,^3F_2$	—	A = —85,726 B = 21,07	—
23	^{51}V ($^4F_{3/2}$), 7/2	$3\,^4F_{3/2}$	—	A = 560,07 B = 3,98	—
		$3\,^6D_{1/2}$	—	A = 751,53	—
		$3\,^6D_{3/2}$	—	A = 405,64 B = —7,0	—
		$3\,^6D_{5/2}$	—	A = 373,53 B = —5,0	—
		$3\,^6D_{7/2}$	—	A = 382,37 B = 2,3	—
24	^{53}Cr ($^7S_3$), 3/2	$3\,^7S_3$	(9/2, 7/2) (7/2, 5/2) (5/2, 3/2)	371,7 289,09 206,50	12,40 9,643 6,888
25	^{55}Mn ($^6S_{5/2}$), 5/2	$3\,^6S_{5/2}$	—	A = —72,4208 B = —0,018	—
		$4\,^6D_{9/2}$	—	A = 510,3 B = 132,2	—
		$4\,^6D_{7/2}$	—	A = 458,9 B = 21,7	—
		$4\,^6D_{5/2}$	—	A = 436,7 B = —46,8	—
		$4\,^6D_{3/2}$	—	A = 469,4 B = —65,1	—
		$4\,^6D_{1/2}$	—	A = 882,1	—
26	^{57}Fe ($^5D_4$), 1/2	$3\,^5D_4$	—	A = 38,08	—
		$4\,^5F_5$	—	A = 87,25	—

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра I	Терм	Квантовые числа полного момента (F, F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu(F, F')$, A, B, МГц	$\Delta E\ (F,F')$, 10^{-3} см$^{-1}$
		$4\,^5F_4$	—	$A = 78{,}43$	—
		$4\,^5F_3$	—	$A = 69{,}63$	—
		$4\,^5F_2$	—	$A = 55{,}99$	—
27	^{59}Co ($^4F_{9/2}$), 7/2	$3\,^4F_{9/2}$	(8,7)	3655	121,9
			(7,6)	3169,4	105,7
			(6,5)	2695	89,9
			(5,4)	2230,6	74,40
			(4,3)	1774,5	59,19
28	^{61}Ni ($^3F_4$), 3/2	$3\,^3F_4$	—	$A = -215{,}04$ $B = -56{,}9$	—
29	^{63}Cu ($^2S_{1/2}$), 3/2	$4\,^2S_{1/2}$	(2,1)	11733,8174	391,398
	^{65}Cu ($^2S_{1/2}$), 3/2	$4\,^2S_{1/2}$	(2,1)	12568,780	419,250
30	^{67}Zn ($^1S_0$), 5/2	$4\,^3P_2$	(9/2, 7/2)	2418,1	80,66
			(7/2, 5/2)	1855,7	61,90
			(5/2, 3/2)	1312,1	43,77
			(3/2, 1/2)	781,9	26,08
31	^{69}Ga ($^2P_{1/2}$),3/2	$4\,^2P_{1/2}$	(2,1)	2677,987	89,328
		$4\,^2P_{3/2}$	—	$A = 190{,}794$ $B = 62{,}522$	—
		$5\,^2S_{1/2}$	(2,1)	2140	71,3
	^{71}Ga ($^2P_{1/2}$), 3/2	$4\,^2P_{1/2}$	(2,1)	3402,69	113,50
		$4\,^2P_{3/2}$	(3,2)	766,696	25,574
			(2,1)	445,470	14,859
			(1,0)	203,043	6,773
		$5\,^2S_{1/2}$	(2,1)	2720	90,6
32	^{73}Ge ($^3P_0$), 9/2	$4\,^3P_1$	—	$A = 15{,}55$ $B = -54{,}57$	—
		$4\,^3P_2$	—	$A = -64{,}427$ $B = 111{,}8$	—
33	^{75}As ($^4S_{3/2}$), 3/2	$4\,^4S_{3/2}$	—	$A = -66{,}20$ $B = -0{,}53$	—
			(3,2)	819,45	27,33
			(2,1)	595,12	19,85
36	^{83}Kr ($^1S_0$), 9/2	$5p\,[^1/_2]_1$	—	$A = -143{,}0$	—
37	^{85}Rb ($^2S_{1/2}$), 5/2	$5\,^2S_{1/2}$	(3,2)	3035,732	101,261
		$5\,^2P_{1/2}$	—	$A = 120{,}7$	—
		$5\,^2P_{3/2}$	—	$A = 25{,}0$ $B = 26{,}0$	—
		$4\,^2D_{5/2}$	—	$A = -5$	—
		$4\,^2D_{3/2}$	—	$A = 7$	—
		$6\,^2S_{1/2}$	—	$A = 239$	—
	^{87}Rb ($^2S_{1/2}$), 3/2	$5\,^2S_{1/2}$	(2,1)	6834,6826	227,98
		$5\,^2P_{1/2}$	—	$A = 406$	—
		$5\,^2P_{3/2}$	—	$A = 84{,}9$ $B = 12{,}6$	—
		$4\,^2D_{5/2}$	—	$A = -17$	—
		$4\,^2D_{3/2}$	—	$A = 25$	—
		$6\,^2S_{1/2}$	—	$A = 810$	—
39	^{89}Y ($^2D_{3/2}$), 1/2	$4\,^2D_{3/2}$	—	$A = -57{,}2$	—
		$4\,^2D_{5/2}$	—	$A = -28{,}8$	—
42	^{95}Mo ($^7S_3$), 5/2	$5\,^7S_3$	–	$A = -208{,}5828$ $B = 0{,}0087$	—
		$5\,^5S_2$	–	$A = 428{,}84$ $B = 0{,}028$	–
	^{97}Mo ($^7S_3$), 5/2	$5\,^7S_3$	—	$A = -212{,}9817$	—
		$5\,^5S_2$	—	$A = 437{,}89$	—
47	^{107}Ag ($^2S_{1/2}$), 1/2	$5\,^2P_{3/2}$	—	$A = -32$	—

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра I	Терм	Квантовые числа полного момента (F, F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu$ (F, F'), A, B, МГц	ΔE (F, F'), 10^{-3} см$^{-1}$
49	$^{113}In(^2P_{1/2})$, 9/2	$5\,^2P_{1/2}$	(5,4)	11 385	379,8
		$6\,^2S_{1/2}$	(5,4)	8410	281
	$^{115}In(^2P_{1/2})$, 9/2	$5\,^2P_{1/2}$	—	$A = 2281,955$	—
		$5\,^2P_{3/2}$	—	$A = 242,165$	—
		$6\,^2S_{1/2}$	(5,4)	8430	281
51	$^{123}Sb(^4S_{3/2})$, 7/2	$5\,^4S_{3/2}$	(5,4)	815,6	27,20
			(4,3)	648,5	21,63
			(3,2)	484,0	16,1
52	$^{125}Te(^3P_2)$, 1/2	$5\,^3P_2$	—	$A = -1010,3$	—
		$5\,^3P_1$	—	$A = 782,5$	—
		$5\,^1D_2$	—	$A = -2887,0$	—
53	$^{127}I(^2P_{3/2})$, 5/2	$5\,^2P_{3/2}$	(4,3)	4226,17	140,97
			(3,2)	1965,9	65,58
			(2,1)	737,49	24,60
54	$^{129}Xe(^1S_0)$, 1/2	$6\,^3P_2$	(5/2, 3/2)	5961,258	198,85
	$^{131}Xe(^1S_0)$, 3/2	$6\,^3P_2$	(7/2, 5/2)	2693,623	89,850
			(5/2, 3/2)	1608,348	53,649
			(3/2, 1/2)	838,764	27,978
55	$^{133}Cs(^2S_{1/2})$, 7/2	$6\,^2S_{1/2}$	(4,3)	9192,63177	306,63342
		$6\,^2P_{1/2}$	—	$A = 292$	—
		$6\,^2P_{3/2}$	—	$A = 50,3$	—
				$B = -0,4$	
		$5\,^2D_{3/2}$	—	$A = 16,3$	—
		$5\,^2D_{5/2}$	—	$A = -22$	—
		$7\,^2S_{1/2}$	—	$A = 550$	—
56	$^{135}Ba(^1S_0)$, 3/2	$5\,^3D_1$	—	$A = -470$	—
				$B = 12$	
		$5\,^3D_2$	—	$A = 371$	—
				$B = 18$	
		$5\,^3D_3$	—	$A = 408$	—
				$B = 20$	
		$5\,^1D_2$	—	$A = -73,4$	—
				$B = 38,7$	
	$^{137}Ba(^1S_0)$, 3/2	$5\,^3D_1$	—	$A = -520$	—
				$B = 17$	
		$5\,^3D_2$	—	$A = 414$	—
				$B = 27$	
		$5\,^3D_3$	—	$A = 455$	—
				$B = 40$	
		$5\,^1D_2$	—	$A = -82,2$	—
				$B = 59,6$	
57	$^{139}La(^2D_{3/2})$, 7/2	$5\,^2D_{3/2}$	(5,4)	737,97	24,62
			(4,3)	551,98	18,41
			(3,2)	391,6	13,06
		$5\,^2D_{5/2}$	(6,5)	1120,90	37,39
			(5,4)	912,79	30,45
			(4,3)	716,29	23,89
			(3,2)	529,1	17,65
		$6\,^4F_{3/2}$	(5,4)	2390,6	79,74
			(4,3)	1925,5	64,23
		$6\,^4F_{5/2}$	(6,5)	1808,9	60,34
			(5,4)	1503,2	50,14
			(4,3)	1199,8	40,02
		$6\,^4P_{1/2}$	(4,3)	9840,6	328,2
		$6\,^4P_{3/2}$	(4,3)	3707,8	123,68
		$6\,^4P_{5/2}$	(4,3)	3216,5	107,3

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра I	Терм	Квантовые числа полного момента (F, F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu$ (F, F'), A, B, МГц	ΔE (F, F'), 10^{-3} см$^{-1}$
59	$^{141}Pr(^4I_{9/2})$, 5/2	$4\,^4I_{9/2}$	—	$A = 926{,}209$ $B = -11{,}88$	—
		$4\,^4I_{11/2}$	—	$A = 730{,}393$ $B = -11{,}88$	—
		$4\,^4I_{13/2}$	—	$A = 613{,}240$ $B = -12{,}85$	—
		$4\,^4I_{15/2}$	—	$A = 541{,}575$ $B = -14{,}56$	—
60	$^{143}Nd(^5I_4)$, 7/2	$4\,^5I_4$	(15/2, 13/2) (13/2, 11/2) (11/2, 9/2) (9/2, 7/2) (7/2, 5/2)	1418 1257,5 1084,7 901,5 710	47,3 41,95 36,18 30,07 23,7
		$4\,^5I_5$	—	$A = -153{,}68$ $B = 115{,}7$	—
	$^{145}Nd(^5I_4)$, 7/2	$4\,^5I_4$	—	$A = -121{,}63$ $B = 64{,}6$	—
		$4\,^5I_5$	—	$A = -95{,}53$ $B = 61{,}0$	—
62	$^{147}Sm(^7F_0)$, 7/2	$4\,^7F_1$	—	$A = -33{,}494$ $B = -58{,}692$	—
		$4\,^7F_2$	—	$A = -41{,}184$ $B = -62{,}23$	—
		$4\,^7F_3$	—	$A = -50{,}240$ $B = -33{,}68$	—
	$^{149}Sm(^7F_0)$, 7/2	$4\,^7F_1$	—	$A = -27{,}611$ $B = 16{,}962$	—
		$4\,^7F_2$	—	$A = -33{,}951$ $B = 17{,}99$	—
		$4\,^7F_3$	—	$A = -41{,}418$ $B = 9{,}75$	—
63	$^{151}Eu(^8S_{7/2})$, 5/2	$4\,^8S_{7/2}$	(6,5) (5,4) (4,3)	120,67 100,29 80,05	4,025 3,345 2,67
	$^{153}Eu(^8S_{7/2})$, 5/2	$4\,^8S_{7/2}$	(6,5) (5,4) (4,3)	54,04 44,00 35,00	1,803 1,47 1,17
64	$^{155}Gd(^9D_2)$, 3/2	$5\,^9D_2$	—	$A = 36{,}575$ $B = 179{,}4$	—
		$5\,^9D_3$	—	$A = 4{,}92$ $B = -406{,}67$	—
		$5\,^9D_4$	—	$A = -6{,}86$ $B = -352{,}8$	—
	$^{157}Gd(^9D_2)$, 3/2	$5\,^9D_2$	—	$A = 47{,}96$ $B = 191{,}2$	—
		$5\,^9D_3$	—	$A = 6{,}45$ $B = -433{,}2$	—
		$5\,^9D_4$	—	$A = -9{,}00$ $B = -375{,}9$	—
65	$^{159}Tb(^6H_{15/2})$, 3/2	$4\,^6H_{15/2}$	—	$A = 673{,}75$ $B = 1449{,}3$	—
		$4\,^6H_{13/2}$	—	$A = 682{,}91$ $B = 1167{,}5$	—
		$5\,^8G_{13/2}$	—	$A = 532{,}20$ $B = 928{,}9$	—
66	$^{161}Dy(^5I_8)$, 5/2	$4\,^5I_8$	—	$A = -116{,}232$ $B = 1091{,}57$	—
	$^{163}Dy(^5I_8)$, 5/2	$4\,^5I_8$	—	$A = 162{,}7543$ $B = 1152{,}86$	—

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра I	Терм	Квантовые числа полного момента (F, F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu\,(F, F')$, A, B, МГц	$\Delta E\,(F, F')$, 10^{-3} см$^{-1}$
		$4\,^5I_7$	—	$A = 177{,}53$ $B = 1066{,}4$	—
67	^{165}Ho($^4I_{15/2}$), 7/2	$4\,^4I_{15/2}$	(9,8)	7184,8	239,7
			(8,7)	6540,8	218,2
			(7,6)	5842,4	194,9
			(6,5)	5096,3	170,0
			(5,4)	4309,3	143,7
68	^{167}Er ($^3H_6$), 7/2	$4\,^3H_6$	—	$A = -120{,}486$ $B = -4552{,}96$	—
69	^{169}Tm($^2F_{7/2}$), 1/2	$4\,^2F_{7/2}$	(4,3)	1496,5507	49,920
			—	$A = -374.13766$	—
71	^{175}Lu($^2D_{3/2}$), 7/2	$5\,^2D_{3/2}$	(5,4)	2051,2201	68,421
			(4,3)	345,497	11,524
			(3,2)	496,578	16,564
		$5\,^2D_{5/2}$	(6,5)	1837,570	61,295
			(5,4)	800,343	26,70
			(4,3)	161,815	5,398
			(3,2)	157,73	5,26
			(2,1)	238,058	7,941
	^{176}Lu($^2D_{3/2}$), 7	$5\,^2D_{3/2}$	—	$A = 137{,}9$ $B = 2131$	—
		$5\,^2D_{5/2}$	—	$A = 104{,}0$ $B = 2624$	—
72	^{177}Hf($^3F_2$), 7/2	$5\,^3F_2$	(11/2, 9/2)	991,792	33,08
			(9/2, 7/2)	477,008	15,91
			(7/2, 5/2)	162,887	5,433
			(5/2, 3/2)	4,864	0,16
	^{179}Hf ($^3F_2$), 9/2	$5\,^3F_2$	(13/2, 11/2)	82,132	2,74
			(11/2, 9/2)	392,848	13,104
			(9/2, 7/2)	541,9104	18,076
			(7/2, 5/2)	558,672	18,635
73	^{181}Ta($^4F_{3/2}$), 7/2	$5\,^4F_{3/2}$	—	$A = 509{,}08$ $B = -1012{,}24$	—
		$5\,^4F_{5/2}$	—	$A = 313{,}47$ $B = -834{,}8$	—
		$5\,^4F_{7/2}$	—	$A = 264{,}41$ $B = -787{,}5$	—
		$5\,^4F_{9/2}$	—	$A = 256{,}62$ $B = -650{,}4$	—
		$5\,^4P_{1/2}$	—	$A = 884{,}17$	—
		$5\,^4P_{3/2}$	—	$A = 379$ $B = -1350$	—
74	^{183}W($^5D_0$), 1/2	$5\,^5D_1$	—	$A = 29{,}12$	—
		$6\,^7S_3$	—	$A = 505{,}6$	—
		$5\,^5D_2$	—	$A = 56{,}3$	—
		$5\,^5D_3$	—	$A = 78{,}0$	—
		$5\,^5D_4$	—	$A = 88{,}3$	—
75	^{185}Re($^6S_{5/2}$), 5/2	$5\,^6S_{5/2}$	—	$A = -56{,}596$ $B = 29{,}635$	—
		$5\,^4P_{5/2}$	—	$A = 880{,}44$ $B = 1618{,}5$	—
	^{187}Re($^6S_{5/2}$), 5/2	$5\,^6S_{5/2}$	—	$A = -57{,}149$ $B = 28{,}05$	—
		$5\,^4P_{5/2}$	—	$A = 889{,}24$ $B = 1531{,}7$	—
		$6\,^6D_{9/2}$	—	$A = 2600$ $B = 2000$	—

Атомный номер Z	Изотоп, терм основного состояния, спин ядра I	Терм	Квантовые числа полного момента (F, F')	Сверхтонкое расщепление уровней	
				$\Delta\nu\,(F,F')$, A, B, МГц	$\Delta E\,(F,\ F')$, 10^{-3} см$^{-1}$
77	^{191}Ir ($^4F_{9/2}$), 3/2	$5\,^4F_{9/2}$	(6,5)	659,265	21,991
			(5,4)	189,440	6,319
			(4,3)	84,050	2,804
	^{193}Ir ($^4F_{9/2}$), 3/2	$5\,^4F_{9/2}$	(6,5)	660,090	22,018
			(5,4)	224,478	7,488
			(4,3)	33,535	1,119
78	^{195}Pt ($^3D_3$), 1/2	$5\,^3D_3$	—	$A = 5702{,}6$	—
		$5\,^3D_2$	—	$A = 2609{,}6$	—
		$6\,^3F_4$	(9/2, 7/2)	3820,56	127,4
79	^{197}Au ($^2S_{1/2}$), 3/2	$6\,^2S_{1/2}$	(2,1)	6099,320	203,452
		$5\,^2D_{5/2}$	—	$A = 80{,}24$ $B = 1049{,}8$	—
		$5\,^2D_{3/2}$	—	$A = 199{,}842$ $B = 911{,}077$	—
80	^{199}Hg ($^1S_0$), 1/2	$6\,^3P_2$	—	$A = 9066{,}45$	—
	^{201}Hg ($^1S_0$), 3/2	$6\,^3P_2$	(7/2, 5/2)	11382,629	379,68
			(5/2, 3/2)	8629,522	287,85
			(3/2, 1/2)	5377,49	179,37
		$6\,^3D_3$	—	$A = -2450$ $B = 60$	—
81	^{203}Tl($^2P_{1/2}$), 1/2	$6\,^2P_{1/2}$	(1,0)	21105,45	704,0026
		$6\,^2P_{3/2}$	(2,1)	524,0599	17,4808
	^{205}Tl ($^2P_{1/2}$), 1/2	$6\,^2P_{1/2}$	(1,0)	21310,83	710,8534
		$6\,^2P_{3/2}$	(2,1)	530,0765	17,6815
82	^{207}Pb ($^3P_0$), 1/2	$6\,^1D_2$	(5/2, 3/2)	1524,5	50,85
83	^{209}Bi ($^4S_{3/2}$), 9/2	$6\,^4S_{3/2}$	—	$A = -446{,}94$ $B = -304{,}65$	—
		$6\,^2D_{3/2}$	—	$A = -1227$ $B = -620$	—
		$6\,^2D_{5/2}$	—	$A \simeq 2503$ $B = 0$	—
		$6\,^2P_{1/2}$	—	$A = 11268$	—
		$6\,^2P_{3/2}$	—	$A = 491{,}03$ $B = 978{,}64$	—
92	^{235}U ($^5L_6^0$), 7/2	$6\,^5L_6^0$	—	$A = -60{,}56$ $B = 4104{,}1$	—
		$6\,^5K_5^0$	—	$A = -68{,}35$ $B = 40{,}1$	—
93	^{237}Np ($^6L_{11/2}$), 5/2	$5\,^6L_{11/2}$	—	$A = 778$ $B = 645$	—

32.5. ИЗОТОПИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА АТОМНЫХ СПЕКТРОВ

В спектрах элементов, обладающих определенным изотопным составом, наблюдают расщепление линий на ряд компонент, каждая из которых характеризует свой нуклид. Возникновение подобной изотопической структуры спектров обусловлено взаимодействием электронов с ядром. Полный гамильтониан взаимодействия атома в системе центра инерции включает в себя движение нуклонов ядра относительно центра инерции (нормальный или боровский эффект массы), зависящее от массы ядра обменное взаимодействие электронов (специфический эффект массы) и взаимодействие валентных электронов с распределенным протонным зарядом ядра (эффект конечности объема ядра). В итоге наблюдаемое изотопическое смещение в спектральных линиях $\delta\nu$ для двух изотопов элемента с массовыми числами A_1 и A_2 ($A=Z+N$, Z — число протонов, N — число нейтронов) представляется суммой трех слагаемых [10]

$$\delta\nu^{A_1 A_2} = \delta\nu^{A_1 A_2}_{BMS} + \delta\nu^{A_1 A_2}_{SS} + \delta\nu^{A_1 A_2}_{VS}.$$

В приведенном выражении первый член $\delta\nu^{A_1A_2}_{BMS} = \nu_\infty m_e(M_2 - M_1)/M_1M_2$ характеризует нормальное массовое смещение, наиболее важное для легких элементов ($Z \ll 30$), причем ν_∞ — частота излучательного перехода при бесконечной массе ядер; m_e — масса электрона; M_1, M_2 — массы ядер; $\delta\nu^{A_1A_2}_{SS}$ — специфическое мас-

совое смещение; $\delta\nu_{VS}^{A_1A_2}$ — объемное смещение между линиями двух изотопов, доминирующее в спектре тяжелых элементов ($Z \geqslant 60$). В спектрах элементов середины таблицы Менделеева ($Z \sim 20 \div 25$) наблюдаемое изотопическое смещение мало по абсолютной величине.

Изотопический сдвиг в спектральных линиях $\delta\nu$ обусловлен смещением электронных термов атомов и связан с изотопическими сдвигами верхнего ($\delta T'$) и нижнего (δT) термов соотношением

$$\delta\nu = \delta T' - \delta T.$$

Изотопический сдвиг условно принято считать положительным, если линия перехода для более тяжелого изотопа сдвинута в сторону бо́льших частот. На языке сдвига термов это означает, что отрицательный знак смещения термов соответствует случаю, когда уровень более тяжелого изотопа лежит глубже (его расстояние до границы непрерывного спектра больше) уровня более легкого изотопа. Нормальный массовый эффект приводит к росту энергии связи электрона в более тяжелом изотопе, тогда как вследствие эффекта конечности объема ядра энергия связи электронов меньше для изотопов с большей массой; в итоге эффекты объема и массы ядра противоположны по знаку. При наличии сверхтонкой структуры атомных уровней изотопический сдвиг термов определяется по расстоянию между центрами тяжести компонент сверхтонкой структуры.

В табл. 32.4 включены значения изотопического сдвига $\delta\nu$ резонансных линий для ряда элементов [10—13]. С учетом установленной погрешности измерений числовые значения были округлены по последней значащей цифре (± 1).

Таблица 32.4. **Изотопическое смещение резонансных линий атомов**

Атомный номер Z	Элемент (основной терм)	Переход между термами	Длина волны λ, 10^{-10} м	Массовые числа изотопов A_1—A_2	Изотопическое смещение линий $\delta\nu_{A_1A_2}$, 10^{-3} см$^{-1}$
1	H ($1s$—$^2S_{1/2}$)	$1\,^2S_{1/2}$—$2\,^2P^\circ$	1215,7	1—2	$2{,}238 \cdot 10^4$
				1—3	$2{,}983 \cdot 10^4$
				2—3	$7{,}477 \cdot 10^3$
2	He ($1s^2$—$^1S_0$)	$1\,^1S_0$—$2\,^1P^\circ$	584,3	3—4	$8{,}8 \cdot 10^3$
3	Li ($2s$—$^2S_{1/2}$)	$2\,^2S_{1/2}$—$2\,^2P^\circ$	6708	6—7	351,3
5	B ($2p$—$^2P^\circ_{1/2}$)	$2p^2\,P^\circ$—$3s\,^2S_{1/2}$	2497	10—11	—170
6	C ($2p^2$—$^3P_0$)	$2p^2\,^1S_0$—$2p\,3s\,^1P^\circ_1$	2478,6	12—13	—160
7	N ($2p^3$—$^4S^\circ_{1/2}$)	$3s\,^2P_{3/2}$—$3p\,^2P^\circ_{3/2}$	8629,2	14—15	70
		$3s\,^4P_{5/2}$—$3p^4P^\circ_{5/2}$	8216,3	14—15	—60
8	O ($2p^4$—$^3P_2$)	$3s\,^3S_1$—$3p\,^3P_1$	8446,8	16—18	140
10	Ne ($2p^6$—$^1S_0$)	$3s'\,[1/2]^\circ_1$—$3p\,[5/2]_2$	7173,9	20—22	70
		$3s\,[3/2]^\circ_2$—$3p\,[1/2]_1$	7032,4	20—22	50
11	Na ($3s$—$^2S_{1/2}$)	$3s\,^2S_{1/2}$—$4p^2P^\circ_{1/2}$	3303,0	23—24	24
12	Mg ($3s^2$—$^1S_0$)	$3s^2\,^1S_0$—$3\,s3p\,^1P^\circ_1$	2852,1	24—25	50
				24—26	60
18	Ar ($3s^6$—$^1S_0$)	$4s\,[3/2]^\circ_2$—$4p'\,[3/2]_1$	7147,0	36—40	20
		$4s'\,[1/2]^\circ_1$—$5p[1/2]_0$	4510,7	36—40	50
19	K	$4s\,^2S_{1/2}$—$4p\,^2P^\circ_{1/2}$	7699,0	39—40	4,19
				39—41	7,85
	($4s$—$^2S_{1/2}$)	$4s\,^2S_{1/2}$—$4p\,^2P^\circ_{3/2}$	7664,9	39—40	4,22
				39—41	7,88
20	Ca ($4s^2$—$^1S_0$)	$4s^2\,^1S_0$—$4s4p\,^1P^\circ_1$	4226,7	40—42	13,0
				40—43	20,4
				40—44	25,7
				40—48	50,4
		$4s^2\,^1S_0$—$4s4p\,^3P^\circ_1$	6572,8	40—41	9,37
				40—42	17,0
				40—43	26,1
				40—44	33,2
				40—48	64,1

Атомный номер Z	Элемент (основной терм)	Переход между термами	Длина волны λ, 10^{-10} м	Массовые числа изотопов A_1—A_2	Изотопическое смещение линий $\delta\nu_{A_1A_2}$, 10^{-3} см$^{-1}$
29	Cu ($3d^{10}4s$—$^2S_{1/2}$)	$4s\ ^2S_{1/2}$—$4p\ ^2P^\circ_{1/2}$	3274,0	63—65	20
30	Zn ($4s^2$—$^1S_0$)	$4s^2\ ^1S_0$—$4s4p\ ^1P^\circ_1$	2138,6	$\Delta A = 2$ (среднее значение)	16
31	Ga ($4p$—$^2P^\circ_{1/2}$)	$4p\ ^2P^\circ_{1/2}$—$5s\ ^2S_{1,2}$	4033.0	69—71	—1,1
		$4p\ ^2P^\circ_{3/2}$—$5s\ ^2S_{1/2}$	4172,1	69—71	—1,3
36	Kr ($4p^6$ — $^1S_0$)	$5s\,[3/2]^\circ_1$—$5p\,[5/2]_2$	8776,7	82—84	2
37	Rb ($5s$ — $^2S_{1/2}$)	$5s\ ^2S_{1/2}$—$5p\ ^2P^\circ_{1/2}$	7947,6	85—87	2,6
		$5s\ ^2S_{1/2}$—$5p\ ^2P^\circ_{3/2}$	7800,2	85—87	2,6
38	Sr ($5s^2$ — $^1S_0$)	$5s^2\ ^1S_0$—$5s5p\ ^1P^\circ_1$	4607,3	84—88 86—88 87—88	9,0 4,2 1,5
		$5s^2\ ^1S_0$—$5s6p\ ^1P^\circ_1$	2931,8	84—88 86—88 87—88	15,9 7,5 3,2
		$5s^2\ ^1S_0$—$5s5p\ ^3P^\circ_1$	6892,6	84—88 86—88 87—88	14,1 6,7 2,7
40	Zr ($4d^25s^2$ — $^3F_2$)	$4d^35s\ ^5F_5$—$4d^35p^5G^\circ_6$	4687,8	90—92 92—94 94—96	—12 —7 —5
47	Ag ($4d^{10}5s$—$^2S_{1/2}$)	$4d^{10}5s^2\ S_{1/2}$—$5p\ ^2P^\circ_{1/2}$	3382,9	107—109	—15
		$4d^{10}5s\ ^2S_{1/2}$—$5p\ ^2P^\circ_{3/2}$	3280,7	107—109	—15
48	Cd ($5s^2$—$^1S_0$)	$5s^2\ ^1S_9$—$5s5p\ ^3P^\circ_1$	3261,0	$\Delta A = 2$ (среднее значение)	—15
49	In ($5p$—$^2P^\circ_{1/2}$)	$5p\ ^2P^\circ_{1/2}$—$6s\ ^2S_{1/2}$	4101,8	113—115	8,6
		$5p\ ^2P^\circ_{3/2}$—$6s\ ^2S_{1/2}$	4511,3	113—115	8,5
54	Xe ($5p^6$—$^1S_0$)	$6s\,[3/2]^\circ_2$—$6p\,[3/2]_2$	8231,6	134—136	—3
55	Cs ($6s$—$^2S_{1/2}$)	$6s\ ^2S_{1/2}$—$6p\ ^2P^\circ_{3/2}$	8521,1	133—134 133—135	1,2 1,2
70	Yb ($4f^{14}6s^2$—$^1S_0$)	$6s^2\ ^1S_0$—$6s6p\ ^1P^\circ_1$	3988,0	174—176 174—172	17 18
71	Lu ($5d6s^2$—$^2D_{3/2}$)	$5d6s^2\ ^2D_{3/2}$—$5d6s6p\ ^4F^\circ_{3/2}$	5736,5	175—176	—13,1
		$5d6s^2\ ^2D_{5/2}$ — $5d6s6p\ ^4F^\circ_{5/2}$	6055,0	175—176	—13,9
		$5d6s^2\ ^2D_{5/2}$—$5d6s6p\ ^4F^\circ_{7/2}$	5421,9	175—176	—13,6
79	Au ($5d^{10}6s$—$^2S_{1/2}$)	$6s\ ^2S_{1/2}$—$6p\ ^2P^\circ_{1/2}$	2675,9	195—197 193—197 192—197 191—197 190—197	—100 —210 —280 —320 —370
80	Hg ($5d^{10}6s^2$—$^1S_0$)	$6s^2\ ^1S_0$—$6s6p\ ^3P^\circ_1$	2536,5	198—199 198—200 199—201 200—202 202—204	—9 —160 —210 —180 —160

Атомный номер Z	Элемент (основной терм)	Переход между термами	Длина волны λ, 10^{-10} м	Массовые числа изотопов A_1—A_2	Изотопическое смещение линий $\delta\nu_{A_1A_2}$, 10^{-3} см$^{-1}$
81	Tl ($6s^26p$—$^2P^\circ_{1/2}$)	$6p\ ^2P^\circ_{3/2}$—$7s\ ^2S_{1/2}$	5350,5	203—205	—58,6
82	Pb ($6p^2$—$^3P_0$)	$6p^2\ ^3P_0$—$6p7s\ ^3P^\circ_1$	2833,1	207—208 206—208 204—208 202—208	—47 —75 —140 —207

32.6. СПЕКТРЫ ДВУХАТОМНЫХ МОЛЕКУЛ

Полосатые молекулярные спектры поглощения и излучения возникают при переходах между дискретными уровнями молекул. В точной постановке задача определения энергетических уровней молекулы не имеет решения и для учета взаимного влияния движения электронов и ядер, связи спиновых моментов с орбитальными и т. д. приходится опираться на приближенные методы, использующие характерные особенности внутримолекулярных взаимодействий. Вследствие заметной разницы в массах скорость движения электронов в молекулах велика по сравнению со скоростью движения ядер и стало быть электроны и ядра вносят неодинаковый вклад в полную энергию молекулы. При этом оказалось возможным отделить проблему определения энергии, связанной с движением электронов в поле ядер, от энергии собственно ядерного движения и учесть методами последовательных приближений взаимное влияние электронной (характеризующейся относительно большой частотой переходов) и ядерной (характеризующейся относительно малой частотой переходов) подсистем в молекуле.

В итоге с практически достаточной во многих случаях точностью можно представить полную энергию двухатомной молекулы в заданном состоянии n в виде суммы

$$E_n = T_e + T_{vJ}\ ,$$

где T_e — электронная, а T_{vJ} — колебательно-вращательная энергия; v, J — колебательное и вращательное квантовые числа молекулы соответственно. Для не слишком сильно возбужденных колебательных состояний в молекуле можно воспользоваться тем или иным разложением энергии T_{vJ} в ряд по степеням квантовых чисел v и J, например в виде,

$$T_{vJ} = G(v) + F_v(J) = [\omega_e(v+1/2) - \omega_e x_e(v+1/2)^2 + \ldots] + [B_v J(J+1) - D_v J^2(J+1)^2 + \ldots].$$

В приведенном выражении колебательная энергия молекулы $G(v)$ соответствует модели так называемого ангармонического осциллятора, причем ω_e — частота гармонических колебаний, $\omega_e x_e$ — постоянная ангармонизма. Вращательная энергия молекулы $F_v(J)$ соответствует модели нежесткого ротатора и учитывает взаимодействие между колебательным и вращательным движениями молекулы, так что вращательные постоянные B_v, D_v ... зависят от уровня колебательного возбуждения v: $B_v = B_e - \alpha_e(v+1/2) + \ldots$, $D_v = D_e + \beta_e(v+1/2) + \ldots$, здесь индекс e относится к равновесному межъядерному расстоянию двухатомной молекулы.

С учетом проведенного выше разбиения энергии молекулы можно записать волновое число для перехода между выделенными состояниями n' и n'' в виде: $\nu = E_{n'} - E_{n''} = T'_e + G' + F' - (T''_e + G'' + F'')$. Соответственно наблюдают спектры нескольких типов: а) вращательные спектры, отвечающие переходам между вращательными уровнями в пределах неизменного колебательного и электронного состояния; б) колебательно-вращательные спектры, возникающие при переходах между вращательными уровнями разных колебательных состояний при неизменном электронном состоянии; в) электронные спектры, характеризующие переходы между колебательно-вращательными уровнями разных электронных состояний. Помимо того, в радиочастотной и микроволновой областях спектра наблюдают переходы между подуровнями тонкой структуры для данного электронно-колебательно-вращательного уровня молекулы, а также спектры электронно-спинового и ядерно-магнитного резонансов, соответствующих переходам между зеемановскими компонентами расщепленных в магнитном поле уровней молекулы.

Таблица 32.5. **Спектроскопические постоянные основных состояний двухатомных молекул**

Молекула	Терм основного состояния	Равновесное межъядерное расстояние r_e, 10^{-10} м	Частота гармонических колебаний ω_e, см$^{-1}$	Постоянная ангармонизма $\omega_e x_e$, см$^{-1}$	Вращательная постоянная B_e, см$^{-1}$	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия α_e, 10^{-3} см$^{-1}$	Приведенная масса для доминантного изотопного состава μ_A, а. е. м.	Энергия диссоциации D_0°, 10^4 см$^{-1}$
Ag_2	$X\ ^1\Sigma^+_g$	2,7	192,4	0,64	0,496	0,19	53,948	1,34
AgBr	$X\ ^1\Sigma^+$	2,393	247,7	0,68	0,0634	0,228	46,424	2,5
AgCl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,281	343,5	1,17	0,123	0,6	26,350	2,60
AgF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,983	513,45	2,59	0,266	1,92	16,132	2,9
AgH	$X\ ^1\Sigma^+$	1,618	1760	34,1	6,449	201	0,9984	1,84
AgI	$X\ ^1\Sigma^+$	2,545	206,5	0,44	0,0449	0,15	58,025	2,1

Молекула	Терм основного состояния	Равновесное межъядерное расстояние r_e, 10^{-10} м	Частота гармонических колебаний ω_e, $см^{-1}$	Постоянная ангармонизма $\omega_e x_e$, $см^{-1}$	Вращательная постоянная B_e, $см^{-1}$	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия α_e, 10^{-3} $см^{-1}$	Приведенная масса для доминантного изотопного состава μ_A, а. е. м.	Энергия диссоциации D_0°, 10^4 $см^{-1}$
AgO	$X\ ^2\Pi_{1/2}$	2,003	490,2	3,1	0,3020	2,5	13,913	1,8
Al_2	$X\ ^3\Sigma_g^-$	2,47	350,0	2,02	0,2054	1,2	13,491	1,5
AlBr	$X\ ^1\Sigma^+$	2,295	378,2	1,33	0,1592	0,86	20,107	3,6
AlCl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,130	481,3	1,95	0,2439	1,61	15,230	4,13
AlF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,6544	802,3	4,8	0,552	5,0	11,148	5,6
AlH	$X\ ^1\Sigma^+$	1,648	1683	29,1	6,3907	186	0,9715	2,5
AlI	$X\ ^1\Sigma^+$	2,537	316,1	1,0	0,1177	0,559	22,251	3,0
AlO	$X\ ^2\Sigma^+$	1,618	979,2	6,97	0,6414	5,8	10,042	4,23
AlS	$X\ ^2\Sigma^+$	2,029	617,1	3,33	0,2799	1,8	14,633	3,1
AlSe	$X\ ^2\Sigma$	—	467,6	2,08	—	—	20,171	2,8
Ar_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	3,76	25,7*	2,6	0,060	3,7	19,981	0,00848
As_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	2,103	429,6	1,12	0,1018	0,333	37,461	3,2
AsF	$X_1\ ^3\Sigma^-$	1,736	685,8	3,1	0,365	2,4	15,155	3,4
AsH	$X\ ^3\Sigma^-$	1,523	2180	50	7,307	212	0,9944	2,9
AsN	$X\ ^1\Sigma^+$	1,618	1068,5	5,41	0,5455	3,37	11,798	5,2
AsO	$X\ ^2\Pi_{1/2}$	1,624	967,1	4,85	0,4848	3,30	13,181	3,99
AsP	$X\ ^1\Sigma^+$	2,00	604,0	2,0	0,192	0,8	21,914	3,6
AsS	$X_1\ ^2\Pi_{1/2}$	2,017	567,9	1,97	0,1848	0,8	22,409	3,0
Au_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	2,472	190,9	0,420	0,028	0,072	98,483	1,86
AuAl	$X\ ^1\Sigma^+$ (O^+)	2,338	333,0	1,16	0,1299	0,67	23,731	2,69
AuBe	$X\ ^2\Sigma^+$	2,060	607,7	3,5	0,4607	4,0	8,6179	2,3
AuH	$X\ ^1\Sigma^+$	1,524	2305,0	43,1	7,240	214	1,0027	2,6
AuMg	$X\ ^2\Sigma^+$	2,443	307,9	1,1	0,1321	0,7	21,381	2,0
B_2	$X\ ^3\Sigma_g^-$	1,589	1051,3	9,4	1,212	14	5,5047	2,4
BBr	$X\ ^1\Sigma^+$	1,89	684,3	3,52	0,489	3,5	9,6615	3,6
BCl	$X\ ^1\Sigma^+$	1,716	839,1	5,11	0,6838	6,46	8,3732	4,5
BF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,2626	1402,1	11,8	1,5072*	19,8	6,9702	6,30
BH	$X\ ^1\Sigma^+$	1,232	2367	49,4	12,02	412	0,9233	2,76
BI	$X\ ^1\Sigma^+$	2,14*	575	3,0	0,36*	—	10,1305	—
BN	$X\ ^3\Pi$	1,281	1515	12,3	1,666	25	6,1635	2,6
BO	$X\ ^2\Sigma^+$	1,2048	1885,3	11,7	1,7811	16,5	6,5209	6,68
BS	$X\ ^2\Sigma^+$	1,609	1180,2	6,31	0,7949	6,0	8,1894	4,85
BaBr	$X\ ^2\Sigma^+$	2,8445	193,8	0,41	0,0415	0,122	50,194	3,1
BaCl	$X\ ^2\Sigma^+$	2,683	279,9	0,80	0,0840	0,334	27,895	3,7
BaF	$X\ ^2\Sigma^+$	2,159	469,4	1,83	0,2165	1,16	16,698	4,88
BaH	$X\ ^2\Sigma^+$	2,2317	1168,3	14,5	3,3828	66	1,0005	1,45
BaI	$X\ ^2\Sigma^+$	3,085	152,1	0,27	0,0268	0,066	66,088	3,56
BaO	$X\ ^1\Sigma^+$	1,9397	669,8	2,03	0,3126	1,39	14,333	4,69
BaS	$X\ ^1\Sigma^+$	2,507	379,4	0,884	0,1033	0,32	25,955	3,52
Be_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	2,45	223,4*	20	0,618	20	4,5061	0,067

Молекула	Терм основного состояния	Равновесное межъядерное расстояние r_e, 10^{-10} м	Частота гармонических колебаний ω_e, $см^{-1}$	Постоянная ангармонизма $\omega_e x_e$, $см^{-1}$	Вращательная постоянная B_e, $см^{-1}$	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия α_e, 10^{-3} $см^{-1}$	Приведенная масса для доминантного изотопного состава μ_A, а. е. м.	Энергия диссоциации D_0°, 10^4 $см^{-1}$
BeBr	$X\ ^2\Sigma^+$	1,953*	715	3,8	0,546*	—	8,0885	3,3
BeCl	$X\ ^2\Sigma^+$	1,797	846,7	4,8	0,7285	6,9	7,1655	3,6
BeF	$X\ ^2\Sigma^+$	1,361	1267	9,1	1,489	17,6	6,1126	5,05
BeH	$X\ ^2\Sigma^+$	1,345	2071,9	48,1	10,274	207	0,9065	1,64
BeI	$X\ ^2\Sigma^+$	2,179*	611,7	1,6	0,422*	—	8,4146	—
BeO	$X\ ^1\Sigma^+$	1,331	1487,3	11,83	1,651	19,0	5,7643	3,7
BeS	$X\ ^1\Sigma^+$	1,742	997,9	6,14	0,7906	6,64	7,0305	3,1
Bi_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	2,661	173,06	0,376	0,0228	0,053	104,49	1,6
BiBr	$X\ O^+$	2,6095	209,5	0,5	0,0432	0,133	57,285	2,21
BiCl	$X\ O^+$	2,5	308	1,0	0,09	—	29,956	2,5
BiF	$X_1\ O^+$	2,051	513	2,3	0,230	1,5	17,415	2,7
BiH	$X\ ^3\Sigma^-\ (O^+)$	1,80	1635,7*	32	2,59	54	1,9949	2,0
BiI	$X\ O^+$	2,800	163,9	0,28	0,0272	0,070	78,957	1,57
BiO	$X_1\ ^2\Pi_{1/2}$	1,93	692	4,3	0,303	2	14,858	2,8
BiS	$X\ ^2\Pi_{1/2}$	2,319	408,7	1,5	0,1128*	0,49	27,730	2,6
Br_2	$X\ ^1\Sigma_g^+(O_g^+)$	2,281	325,32	1,077	0,0821	0,318	39,459	1,589
BrCl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,136	444,28	1,84	0,1525	0,77	24,232	1,61
BrF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,759	670,75	4,05	0,3558	2,61	15,312	2,055
BrO	$X_1\ ^2\Pi_{3/2}$	1,717	779	6,8	0,4296	3,64	13,299	1,93
C_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	1,2425	1854,7	13,34	1,820	17,6	6,0000	5,01
CCl	$X\ ^2\Pi_{1/2}$	1,645	876,74	5,33	0,6971	6,7	8,9341	3,3
CF	$X\ ^2\Pi_r$	1,272	1308,1	11,1	1,417	18,4	7,3546	4,57
CH	$X\ ^2\Pi_r$	1,120	2858,5	63,0	14,46	534	0,9297	2,79
CN	$X\ ^2\Sigma^+$	1,172	2068,6	13,1	1,8997	17,37	6,4622	6,26
CO	$X\ ^1\Sigma^+$	1,1283	2169,81	13,29	1,93128	17,50	6,8562	8,946
CP	$X\ ^2\Sigma^+$	1,562	1239,7	6,86	0,7986	5,97	8,6491	4,3
CS	$X\ ^1\Sigma^+$	1,535	1285,16	6,50	0,8200	5,92	8,7252	5,93
CSe	$X\ ^1\Sigma^+$	1,676	1035,4	4,9	0,575	3,8	10,433	4,8
Ca_2	$X\ ^1\Sigma^+$	4,278	64,93	1,065	0,04612	0,70	19,981	0,106
CaBr	$X\ ^2\Sigma^+$	2,594	285	0,9	0,0945	0,404	26,529	2,6
CaCl	$X\ ^2\Sigma^+$	2,4368	370,20	1,373	0,1522	0,799	18,650	3,47
CaF	$X\ ^2\Sigma^+$	1,967	581*	2,74	0,338	2,6	12,877	4,4
CaH	$X\ ^2\Sigma^+$	2,002	1298,3	19,1	4,277	97	0,9830	1,4
CaI	$X\ ^2\Sigma^+$	2,829	238,6	0,628	0,0693	0,263	30,392	2,2
CaO	$X\ ^1\Sigma^+$	1,822	732,1	4,8	0,444	3,4	11,423	3,8
CaS	$X\ ^1\Sigma^+$	2,318	462,2	1,78	0,17667	0.84	17,762	2,8
CdH	$X\ ^2\Sigma^+$	1,781*	1337,1	—	5,323*	—	0,9990	0,55
Cl_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	1,988	559,7	2,67	0,2440	1,5	17,484	1,9997
ClF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,6283	786,15	6,16	0,5165	4,36	12,310	2,111
ClO	$X\ ^2\Pi_i$	1,570	854	5,5	0,6234	6	10,975	2,218

Молекула	Терм основного состояния	Равновесное межъядерное расстояние r_e, 10^{-10} м	Частота гармонических колебаний ω_e, $см^{-1}$	Постоянная ангармонизма $\omega_e x_e$, $см^{-1}$	Вращательная постоянная B_e, $см^{-1}$	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия α_e, 10^{-3} $см^{-1}$	Приведенная масса для доминантного изотопного состава μ_A, а. е. м.	Энергия диссоциации D_0°, 10^4 $см^{-1}$
Cr_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	1,679	452,3*	9	0,230	4	25,970	1,26
CrH	$X\ ^6\Sigma$	1,656	1581*	30	6,22	180	0,9886	2,3
CrO	$X\ ^5\Pi_r$	1,61	898	6,7	0,53	5	12,229	3,2
Cs_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	4,648	42,02	0,082	0,0127	0,026	66,453	0,3628
CsBr	$X\ ^1\Sigma^+$	3,072	149,7	0,37	0,036	0,12	49,516	3,36
CsCl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,906	214,2	0,73	0,072	0,34	27,685	3,69
CsF	$X\ ^1\Sigma^+$	2,345	352,6	1,61	0,1844	1,18	16,622	4,15
CsH	$X\ ^1\Sigma^+$	2,494	891	12,9	2,710	58	1,0002	1,436
CsI	$X\ ^1\Sigma^+$	3,315	119,2	0,254	0,0236	0,068	64,918	2,87
Cu_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	2,220	264,5*	1,02	0,1087	0,61	31,465	1,64
CuBr	$X\ ^1\Sigma^+$	2,173	315	0,96	0,1019	0,45	35,011	1,9
CuCl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,051	415,3	1,58	0,176	1,00	22,728	3,17
CuF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,745	621,55	3,49	0,3794	4,23	14,593	3,6
CuH	$X\ ^1\Sigma^+$	1,463	1941,3	37,5	7,944	256	0,9919	2,3
CuI	$X\ ^1\Sigma^+$	2,338	264	0,6	0,0733	0,284	42,069	2,4
CuO	$X\ ^2\Pi_{3/2}$	1,724	640,2	4,4	0,4445	4,6	12,753	2,3
CuS	$X\ ^2\Pi_{3/2}$	2,054*	414	1,7	0,1884*	1,1	21,201	2,3
F_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	1,412	916,6	11,24	0,8902	13,85	9,4992	1,292
GaBr	$X\ ^1\Sigma^+$	2,352	263,0	0,81	0,0818	0,32	37,221	3,5
GaCl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,202	365,3	1,2	0,1499	0,794	23,199	3,97
GaF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,774	622,2	3,2	0,3595	2,86	14,893	4,8
GaH	$X\ ^1\Sigma^+$	1,66	1604,5	28,8	6,137	181	0,9933	2,3
GaI	$X\ ^1\Sigma^+$	2,575	216,6	0,5	0,0569	0,19	44,666	2,8
Ge_2	$X\ ^3\Sigma_g^-$	2,44	274	—	0,078	—	36,454	2,3
GeF	$X\ ^2\Pi_{1/2}$	1,745	665,7	3,15	0,3658	2,67	15,114	4,0
GeH	$X\ ^2\Pi_r$	1,588	1833,8*	40	6,726	192	0,9939	2,6
GeO	$X\ ^1\Sigma^+$	1,625	986,49	4,47	0,4857	3,08	13,150	5,5
GeS	$X\ ^1\Sigma^+$	2,012	576	1,8	0,1866	0,749	22,319	4,58
GeSe	$X\ ^1\Sigma^+$	2,135	409	1,4	0,0963	0,289	38,401	4,0
GeTe	$X\ ^1\Sigma^+$	2,340	324	0,7	0,0653	0,172	47,113	3,4
H_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	0,7414	4401,21	121,34	60,85	3062	0,5039	3,6118
HD	$X\ ^1\Sigma_g^+$	0,7414	3813,1	91,6	45,65	1990	0,6717	3,6406
HT	$X\ ^1\Sigma_g^+$	0,7414	3597,0	81,68	40,60	1664	0,7554	3,6512
D_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	0,7415	3115,5	61,8	30,44	1079	1,0071	3,6748
DT	$X\ ^1\Sigma_g^+$	0,7414	2845,5	51,4	25,40	822	1,2076	3,6881
T_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	0,7414	2546,5	41,2	20,33	589	1,5080	3,7028
HBr	$X\ ^1\Sigma^+$	1,4144	2649,0	45,22	8,4649	233	0,9954	3,03
HCl	$X\ ^1\Sigma^+$	1,2746	2990,95	52,82	10,593	307,2	0,9796	3,576
HF	$X\ ^1\Sigma^+$	0,9168	4138,3	89,9	20,96	798	0,9571	4,73

Молекула	Терм основного состояния	Равновесное межъядерное расстояние r_e, 10^{-10} м	Частота гармонических колебаний ω_e, $см^{-1}$	Постоянная ангармонизма $\omega_e x_e$, $см^{-1}$	Вращательная постоянная B_e, $см^{-1}$	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия α_e, $10^{-3} см^{-1}$	Приведенная масса для доминантного изотопного состава μ_A, а. е. м.	Энергия диссоциации D_0°, 10^4 $см^{-1}$
HI	$X\ ^1\Sigma^+$	1,6092	2309,01	39,64	6,4264*	169	0,9999	2,463
HfO	$X\ ^1\Sigma$	1,723	974,1	3,23	0,3865	1,72	14,689	6,6
Hg_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	2,92	44	0,5	0,02	—	100,48	0,089
HgCl	$X\ ^2\Sigma$	2,395	292,6	1,63	0,098	0,5	29,808	0,863
HgH	$X\ ^2\Sigma$	1,766*	1203,2*	120	5,389*	—	1,0028	0,3020
HoF	X	1,940	615,3	2,60	0,2630	1,4	17,036	4,5
I_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	2,666	214,52	0,609	0,0374	0,114	63,452	1,2333
IBr	$X\ ^1\Sigma^+$	2,469	268,6	0,814	0,0568	0,197	48,659	1,466
ICl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,321	384,32	1,51	0,1142	0,53	27,415	1,7366
IF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,910	610,2	3,12	0,2797	1,87	16,525	2,32
IO	$X\ ^2\Pi_{3/2}$	1,868	681,5	4,3	0,3403	2,70	14,205	1,8
InBr	$X\ ^1\Sigma^+$	2,543	221	0,65	0,0549	0,19	47,480	3,2
InCl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,401	317	1,0	0,1091	0,518	26,810	3,6
InF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,985	535,3	2,6	0,2623	1,88	16,303	4,2
InH	$X\ ^1\Sigma^+$	1,838	1476,0	25,6	4,994	143	0,9991	2,0
InI	$X\ ^1\Sigma^+$	2,754	177,08	0,343	0,03687	0,104	60,303	2,8
K_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	3,925	92,405	0,328	0,0562	0,212	19,482	0,415
KBr	$X\ ^1\Sigma^+$	2,821	213	0,8	0,0812	0,40	26,085	3,2
KCl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,667	281	1,3	0,1286	0,790	18,429	3,5
KF	$X\ ^1\Sigma^+$	2,171	428	2,4	0,280	2,34	12,771	4,1
KH	$X\ ^1\Sigma^+$	2,240	986,65	15,84	3,419	94	0,9824	1,429
KI	$X\ ^1\Sigma^+$	3,048	186,5	0,574	0,0609	0,268	29,811	2,7
Kr_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	4,0	24,2	1,3	0,025	1,0	41,956	0,0127
LaF	$X\ ^1\Sigma^+$	2,026*	570*	—	0,2456*	—	16,713	5,0
LaO	$X\ ^2\Sigma^+$	1,826	812,7*	2,2	0,353	1,4	14,343	6,6
LaS	$X\ ^2\Sigma^+$	2,355*	456,7	0,96	0,1169*	0,3	25,990	4,8
Li_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	2,673	351,43	2,595	0,6726	7,04	3,5080	0,8342
LiBr	$X\ ^1\Sigma^+$	2,170	563,2	3,5	0,5554	5,64	6,4432	3,5
LiCl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,021	643,3	4,50	0,7065	8,01	5,8436	3,9
LiF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,564	910,3	7,9	1,345	20,3	5,1238	4,77
LiH	$X\ ^1\Sigma^+$	1,596	1405,6	23,2	7,513	213	0,8812	1,9589
LiI	$X\ ^1\Sigma^+$ (O^+)	2,392	496,84	2,84	0,4432	4,10	6,6484	2,86
LiNa	$X\ ^1\Sigma$	2,81	257	1,6	0,396	3,6	5,3755	0,69
LiO	$X\ ^2\Pi_i$	1,7	850	12	1,20	15	4,8768	2,8
LuF	$X\ ^1\Sigma$	1,917	611,8	2,5	0,2676	16	17,137	4,8
LuH	$X\ ^1\Sigma$	1,912	1500	20	4,602	100	1,0021	—
LuO	$X\ ^2\Sigma^+$	1,790	842	3,1	0,3588	1,6	14,655	5,8
Mg_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	3,889	51,12	1,64	0,0929	3,78	11,993	0,0404
MgBr	$X\ ^2\Sigma^+$	2,36*	374	1,3	0,164*	—	18,395	2,7
MgCa	$X\ ^1\Sigma^+$	4,04	60	2	0,069	2	14,989	0,0662

Молекула	Терм основного состояния	Равновесное межъядерное расстояние r_e, 10^{-10} м	Частота гармонических колебаний ω_e, $см^{-1}$	Постоянная ангармонизма $\omega_e x_e$, $см^{-1}$	Вращательная постоянная B_e, $см^{-1}$	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия α_e, 10^{-3} $см^{-1}$	Приведенная масса для доминантного изотопного состава μ_A, а. е. м.	Энергия диссоциации D_0°, 10^4 $см^{-1}$
MgCl	$X\ ^2\Sigma^+$	2,199	462,1*	2,1	0,2450	1,6	14,227	2,7
MgF	$X\ ^2\Sigma^+$	1,750	721,6	4,9	0,5192	4,7	10,601	3,8
MgH	$X\ ^2\Sigma^+$	1,730	1495,2	31,9	5,826	186	0,9672	1,1
MgO	$X\ ^1\Sigma^+$	1,7484	784,8	5,3	0,5747	5,32	9,5958	3,0
MgS	$X\ ^1\Sigma^+$	2,142	528,7	2,70	0,2680	1,8	13,704	1,9
MnH	$X\ ^7\Sigma$	1,731	1548	29	5,684	157	0,9897	1,9
MnO	$X\ ^6\Sigma$	1,77	840	4,8	0,43	—	12,388	3,0
MnS	$X\ ^6\Sigma^+$	2,066	491,1	1,86	0,1954	0,96	20,210	2,3
N_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	1,0977	2358,6	14,32	1,998	17,3	7,0015	7,871
NBr	$X\ ^3\Sigma^-$	1,79	692	4,72	0,44	4	11,893	2,3
NCl	$X\ ^3\Sigma^-$	1,6108	827,96	5,30	0,6498	6,41	9,9990	3,2
NF	$X\ ^3\Sigma^-$	1,317	1141,4	9,0	1,206	14,9	8,0613	2,8
NH	$X\ ^3\Sigma^-$	1,0372	3281	78,3	16,667	647,6	0,94016	2,64
NO	$X\ ^2\Pi_r\left(\frac{1}{2}\right)$	1,1508	1904,20	14,07	1,6720*	17	7,4664	5,240
NS	$X\ ^2\Pi_r\left(\frac{1}{2}\right)$	1,494	1219	7,3	0,7696*	6,3	9,7380	4,0
NSe	$X_1\ ^2\Pi_{1/2}$	1,652	956,8	5,6	0,518	4	11,915	3,1
Na_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	3,079	159,12	0,725	0,1547	0,874	11,495	0,5943
NaBr	$X\ ^1\Sigma^+$	2,502	302	1,5	0,1513	0,941	17,803	3,0
NaCl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,361	366	2,1	0,2181	1,625	13,871	3,4
NaF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,926	536	3,4	0,4369	4,559	10,402	4,3
NaH	$X\ ^1\Sigma^+$	1,889	1176	21,2	4,89	131	0,9655	1,57
NaI	$X\ ^1\Sigma^+$	2,711	258	1,1	0,1178	0,648	19,464	2,4
NaK	$X\ ^1\Sigma^+$	3,59	124,13	0,511	0,0905	0,46	14,459	0,520
NbO	$X\ ^4\Sigma^-$	1,691	990	3,8	0,432	2	13,646	6,3
Ne_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	3,1*	14*	—	0,17*	60	9,9962	$1,6 \cdot 10^{-3}$
NiH	$X_1\ ^2\Delta_{5/2}$	1,48	1927*	40	7,70*	230	0,9906	2,5
O_2	$X\ ^3\Sigma_g^-$	1,208	1580,2	12,0	1,446	15,9	7,99746	4,126
OH	$X\ ^2\Pi_i\left(\frac{3}{2}\right)$	0,970	3737,8	84,9	18,91	0,724	0,9481	3,54
P_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	1,893	780,8	2,83	0,3036	1,5	15,487	4,06
PBr	$X\ ^3\Sigma^-(O^+)$	2,171	458,3	1,6	0,1607	0,69	22,244	3,6
PCl	$X\ ^3\Sigma^-$	2,0146	551,38	2,23	0,2529	1,51	16,4251	—
PF	$X\ ^3\Sigma^-$	1,590	846,7	4,49	0,567	4,6	11,776	3,7
PH	$X\ ^3\Sigma^-$	1,422	2365	45	8,537	250	0,9761	2,8
PN	$X\ ^1\Sigma^+$	1,491	1337,0	6,9	0,7865	5,54	9,6434	5,1
PO	$X\ ^2\Pi_r$	1,476	1233,3	6,6	0,734	5	10,548	4,92
PS	$X\ ^2\Pi_r$	1,901*	739	3,0	0,2963*	—	15,733	3,7
Pb_2	$X\ ^3\Sigma_g^-(O_g^+)$	2,93	110,1	0,32	0,0189	0,051	103,99	0,66
PbCl	$X_1\ ^2\Pi_{1/2}$	2,18*	304	0,9	0,119*	—	29,936	2,5

Молекула	Терм основного состояния	Равновесное межъядерное расстояние r_e, 10^{-10} м	Частота гармонических колебаний ω_e, $см^{-1}$	Постоянная ангармонизма $\omega_e x_e$, $см^{-1}$	Вращательная постоянная B_e, $см^{-1}$	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия α_e, 10^{-3} $см^{-1}$	Приведенная масса для доминантного изотопного состава μ_A, а. е. м.	Энергия диссоциации D_0°, 10^4 $см^{-1}$
PbF	$X_1\,^2\Pi_{1/2}$	2,057	507,3	2,3	0,2287	1,47	17,408	2,9
PbH	$X\,^2\Pi_{1/2}$	1.839	1564	29,8	4,971	144	1,0030	1,3
PbO	$X\,^1\Sigma^+$	1,922	721	3,5	0,3073	1,91	14,853	3,1
PbS	$X\,^1\Sigma^+$	2,287	429,4	1,3	0,1163	0,44	27,712	2,83
PbSe	$X\,^1\Sigma^+$	2,402	278	0,5	0,0506	0,13	57,732	2,5
PbTe	$X\,^1\Sigma^+$	2,595	212,0	0,4	0,0313	0,07	79,961	2,1
PdD	$X\,^2\Sigma^+$	1,529	1446,0	19,6	3,649	81	1,9772	—
PtC	$X\,^1\Sigma$	1,677	1051,1	4,9	0,5304	3,3	11,304	5,1
PtH	$X_1\,^2\Delta_{5/2}$	1,529	2390	50	7,196	200	1,0026	2,77
PtO	$X\,^1\Sigma$	1,727	851,1	5,0	0,3822	2,8	14,782	3,1
Rb_2	$X\,^1\Sigma_g^+$	4,210	57,78	0,139	0,0224	0,055	42,456	0,393
RbBr	$X\,^1\Sigma^+$	2,945	169,5	0,46	0,0475	0,186	40,903	3,1
RbCl	$X\,^1\Sigma^+$	2,787	230	0,9	0,0876	0,454	24,769	3,5
RbF	$X\,^1\Sigma^+$	2,270	375	2	0,2107	1,52	15,525	4,0
RbH	$X\,^1\Sigma^+$	2,367	937,2	14,17	3,020	73	0,9960	1,5
RbI	$X\,^1\Sigma^+$	3,177	138,5	0,33	0,0328	0,109	50,873	2,7
RhC	$X\,^2\Sigma$	1,613	1049,9	4,94	0,603	4,0	10,747	4,85
S_2	$X\,^3\Sigma_g^-$	1,8894	725,6	2,84	0,2954	1,59	15,986	3,524
SF	$X_1\,^2\Pi_{3/2}$	1,596	837,6	4,47	0,5552	4,46	11,917	2,7
SH	$X\,^2\Pi_i$	1,341	2712	60	9,461*	270	0,9770	2,9
SO	$X\,^3\Sigma^-$	1,481	1149,2	5,6	0,7208	5,74	10,661	4,322
Sb_2	$X\,^3\Sigma_g^-(O_g^+)$	2,35	270,0	0,59	0,0501	—	60,948	2,5
SbF	$X_1\,^3\Sigma^-(O^+)$	1,918	610,2	2,6	0,279	2	16,418	3,6
SbO	$X\,^2\Pi_r$	1,826	820	4	0,358	2	14,126	3,2
SbP	$X\,^1\Sigma^+$	2,21	500,1	1,63	0,141	0,5	24,657	2,97
ScCl	$X\,^1\Sigma^+$	2,23	447	2	0,173	1	19,669	2,7
ScF	$X\,^1\Sigma^+$	1,788	736	4	0,395	2,7	13,355	5,0
ScO	$X\,^2\Sigma^+$	1,668*	973,3	4,2	0,5134*	3	11,797	5,6
Se_2	$X_1\,^3\Sigma_g^-(O_g^+)$	2,166	385,37	0,98	0,0899	0,29	39,958	2,751
SeH	$X_1\,^2\Pi_{3/2}$	1,47*	2400	—	7,8*	—	0,9953	2,6
SeO	$X_1\,^3\Sigma^-(O^+)$	1,648	914,7	4,5	0,465	3,2	13,327	3,56
SeS	$X_1\,^3\Sigma^-(O^+)$	2,037	555,6	1,85	0,1793	0,8	22,670	3,0
Si_2	$X\,^3\Sigma_g^-$	2,25	511.0	2,0	0,239	1,3	13,988	2,6
SiBr	$X\,^2\Pi_r$	2,26*	424	1	0,160*	—	20,655	3,1
SiCl	$X\,^2\Pi_r$	2,06	535,6	2,17	0,256	1,6	15,542	3,8
SiF	$X\,^2\Pi_r$	1,601	857,2	4,73	0,5812	4,9	11,315	4,5
SiH	$X\,^2\Pi_r$	1,520	2042,52	36,06	7,5039	218	0,9728	2,47
SiI	$X_1\,^2\Pi_{1/2}$	2,4	364	1,2	0,12*	—	22,923	2,4
SiN	$X\,^2\Sigma^+$	1,572	1151,4	6,5	0,731	5,6	9,3321	4,2
SiO	$X\,^1\Sigma^+$	1,510	1241,56	6,0	0,7268	5,04	10,177	6,66

Молекула	Терм основного состояния	Равновесное межъядерное расстояние r_e, 10^{-10} м	Частота гармонических колебаний ω_e, $см^{-1}$	Постоянная ангармонизма $\omega_e x_e$, $см^{-1}$	Вращательная постоянная B_e, $см^{-1}$	Постоянная колебательно-вращательного взаимодействия α_e, 10^{-3} $см^{-1}$	Приведенная масса для доминантного изотопного состава μ_A, а. е. м.	Энергия диссоциации D_0°, 10^4 $см^{-1}$
SiS	$X\ ^1\Sigma^+$	1,929	749,5	2,57	0,3035	1,44	14,921	5,2
SiSe	$X\ ^1\Sigma^+$	2,058	580	1,8	0,1920	0,78	20,722	4,5
Sn_2	$X\ ^3\Sigma_g^-\ (O_g^+)$	2,75	189,7	0,5	0,0385	0,1	59,447	1,68
SnCl	$X_1\ ^2\Pi_{1/2}$	2,36	351	1,1	0,112	0,4	27,073	3,5
SnF	$X\ ^2\Pi_{1/2}$	1,94	583	2,7	0,273	1,4	16,362	4,0
SnO	$X\ ^1\Sigma^+$	1,833	822	3,7	0,3557	2,14	14,112	4,41
SnS	$X\ ^1\Sigma^+$	2,209	487,3	1,36	0,1369	0,506	25,241	3,8
SnSe	$X\ ^1\Sigma^+$	2,326	331	0,74	0,0650	0,17	47,954	3,4
SnTe	$X\ ^1\Sigma^+$	2,523	259	0,5	0,0425	0,10	62,352	3,0
Sr_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	4,5	83	—	0,019	—	43,953	0,10
SrBr	$X\ ^2\Sigma^+$	2,735	216,6	0,52	0,05418	0,183	41,585	2,75
SrCl	$X\ ^2\Sigma^+$	2,576	302,6	0,97	0,10156	0,452	25,017	3,4
SrF	$X\ ^2\Sigma^+$	2,075	502	2,3	0,2505	1,55	15,622	4,5
SrH	$X\ ^2\Sigma^+$	2,146	1207,04	17,11	3,6735	80,2	0,9964	1,3
SrI	$X\ ^2\Sigma^+$	2,974	173,8	0,35	0,0367	0,106	51,932	2,3
SrO	$X\ ^1\Sigma^+$	1,920	653,5	4,0	0,3380	2,2	13,533	3,9
SrS	$X\ ^1\Sigma^+$	2,440	388,4	1,3	0,1207	0,44	23,445	2,8
TaO	$X_1\ ^2\Delta_{3/2}$	1,687	1028,7	3,5	0,4028	1,8	14,696	6,6
Te_2	$X_1\ ^3\Sigma_g^-\ (O_g^+)$	2,558	247,07	0,522	0,03967	0,099	64,953	2,159
TeO	$X_1\ O^+$	1,825	797,1	4,0	0,355	2,4	14,241	3,1
TeS	$X_1\ O^+$	2,230	471,2	1,6	0,1322	0,5	25,657	2,8
TeSe	$X_1\ O^+$	2,37	316,2	0,74	0,062	0,2	48,420	2,4
ThO	$X\ ^1\Sigma$	1,840	895,8	2,4	0,3326	1,3	14,963	7,2
TiO	$X\ ^3\Delta_r$	1,620	1009,0	4,50	0,5354	3,0	11,994	5,5
TiS	$X\ ^3\Delta\ (1)$	2,083	558,4*	1,9	0,2018	0,9	19,182	3,8
TlBr	$X\ ^1\Sigma^+$	2,618	192,1	0,4	0,0424	0,13	58,014	2,76
TlCl	$X\ ^1\Sigma^+\ (O^+)$	2,485	284,7	0,88	0,0914	0,40	29,873	3,08
TlF	$X\ ^1\Sigma^+$	2,084	477	2	0,22315	1,50	17,387	3,69
TlH	$X\ ^1\Sigma^+$	1,87	1391	23	4,81	0,15	1,0029	1,6
TlI	$X\ ^1\Sigma^+$	2,814	143*	—	0,0272	0,07	78,379	2,32
VO	$X\ ^4\Sigma^-$	1,589	1011	4,9	0,5482	3,5	12,173	5,2
Xe_2	$X\ ^1\Sigma_g^+$	4,36	21,1	0,6	0,014	—	65,194	0,0186
XeCl	$X\ ^2\Sigma^+$	3,2	26	—0,3	0,060	—	27,641	0,024
YCl	$X\ ^1\Sigma^+$	2,41	381	1	0,116	0,3	25,097	2,8
YF	$X\ ^1\Sigma^+$	1,926	636,3	2,5	0,2904	1,6	15,653	5,0
YO	$X\ ^2\Sigma^+$	1,788	861,46	2,87	0,3889	1,72	13,556	5,9
YbF	$X\ ^2\Sigma^+$	2,016	501,9*	2,2	0,2414*	1	17,128	4,0
YbH	$X\ ^2\Sigma^+$	2,053	1249,5	21,1	3,993	96	1,0020	1,5
ZnH	$X\ ^2\Sigma^+$	1,595	1608	55	6,679	250	0,9922	0,69
ZrO	$X\ ^1\Sigma^+$	1,712	969,8*	4,9	0,4226*	2	13,579	6,3

В табл. 32.5 собраны данные о спектроскопических постоянных основных состояний двухатомных молекул с указанием в отдельной графе символа электронного состояния, параметров колебательно-вращательного состояния ω_e, $\omega_e x_e$, B_e и α_e, значений приведенной массы молекулы $\mu_A = M_1 M_2/(M_1+M_2)$ для доминантного изотопного состава элементов, а также энергии диссоциации D_0°, отвечающей разрыву связи молекулы в основном колебательном состоянии.*. Кроме того, на рис. 32.44—32.48 представлена более детальная информация о ходе электронных термов для небольшого числа хорошо исследованных двухатомных систем — H_2, CO, N_2, NO и O_2.

При отборе материала для табл. 32.5 мы использовали таблицы спектроскопических постоянных двухатомных молекул [3, 14] и многочисленные журнальные публикации последнего времени. Погрешности в определении числовых значений величин были учтеиы при округлении значащих цифр в пределах ±1 для последней приведенной цифры. Оцениваемые погрешности определения электронных термов двухатомных молекул и ионов указаны непосредственно на рис. 32.44—32.48.

* Звездочкой в табл. 32.5 в графах для r_e, ω_e и B_e обозначены, соответственно, значения r_0, $\Delta G_{1/2}$ и B_0.

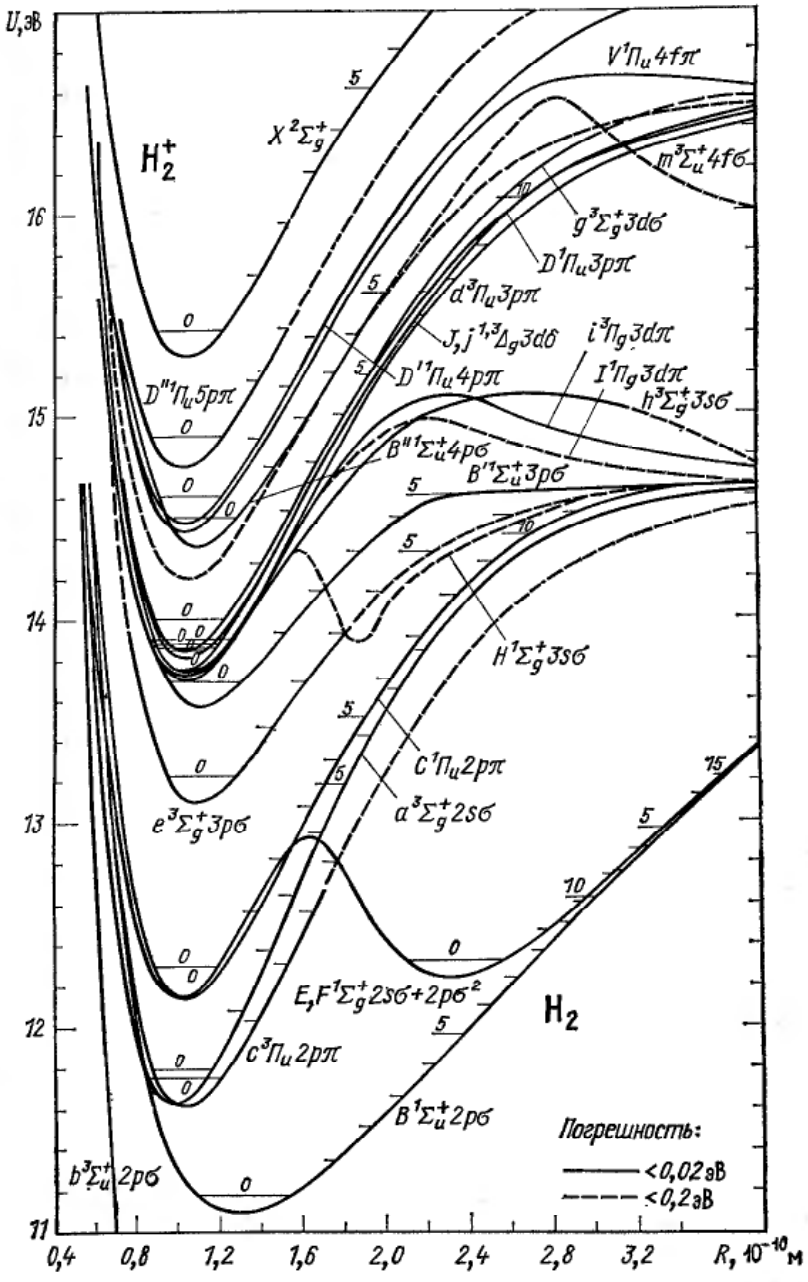


Рис. 32.44. Электронные термы молекул H_2 и H_2^+ [15]

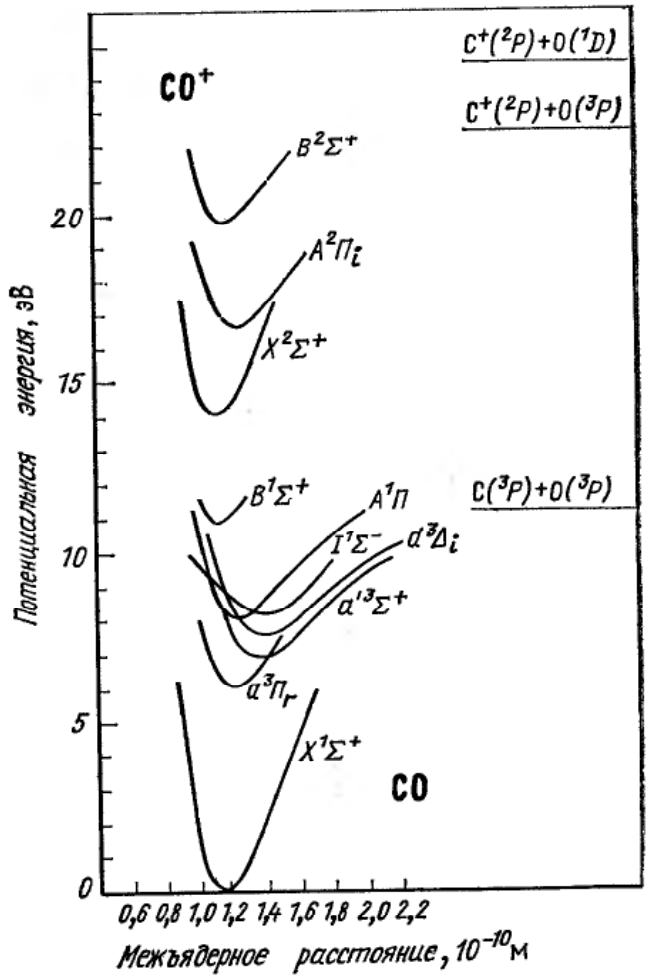


Рис. 32.45. Электронные термы молекул CO и CO^+ [3, 16]

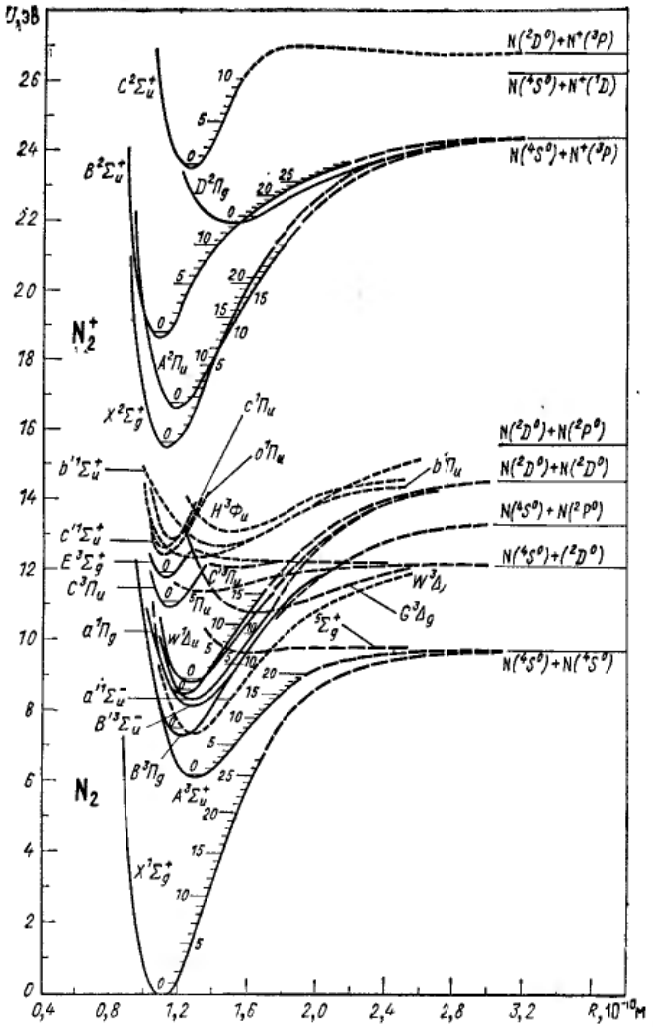


Рис. 32.46. Электронные термы молекул N_2 и N_2^+ [17]

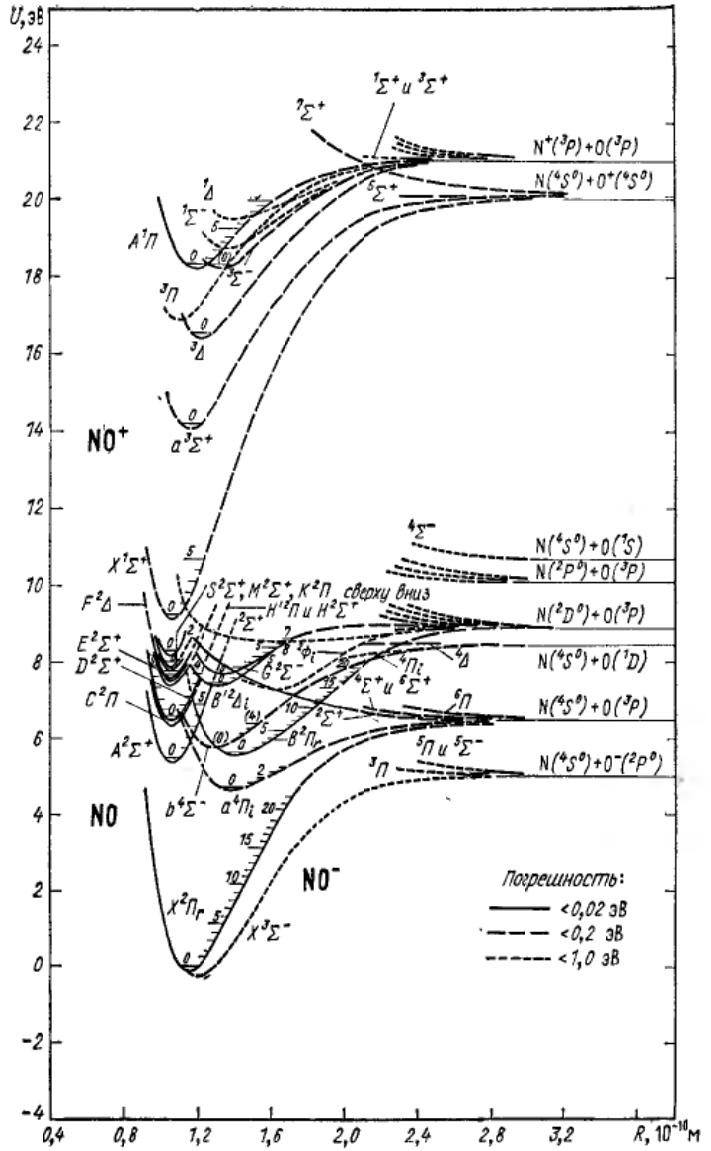


Рис. 32.47. Электронные термы молекул NO, NO^+ и NO^- [3, 18]

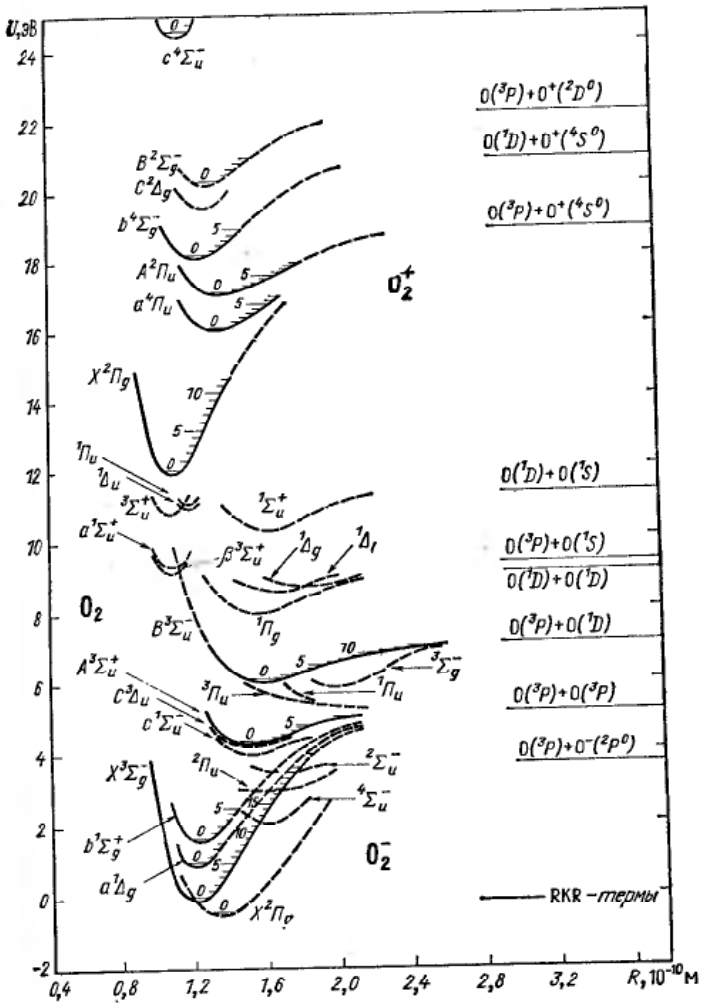


Рис. 32.48. Электронные термы молекул O_2, O_2^+ и O_2^- [19]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Прокопьев В. Е., Яцеико А. С.** Диаграммы Гротриана нейтральных атомов (группы I—III, лантаноиды, актиноиды). Препринт Института автоматики и электрометрии СО АН СССР № 160. Новосибирск. 1981; Уровни энергий и радиационные переходы нейтральных атомов (группы IV—VIII). Препринт Института автоматики и электрометрии СО АН СССР № 161. Новосибирск. 1981.

2. **Bashkin S., Stoner J. O.** Atomic Energy Levels and Grotrian Diagrams. Amsterdam: North-Holland. Vol. 1 (H I—P XV)—1975; Vol. 2. (S I—Ti XXII)—1978; Vol. 3 (V I—Cr XXIV)—1981; Vol. 4 (Mn I—Mn XXV)—1982.

3. **Radzig A. A., Smirnov B. M.** Reference Data on Atoms, Molecules and Ions. Heidelberg: Springer, 1985.

4. **Meggers W. F., Corliss C. H., Scribner B. F.** Tables of Spectral—Line Intensities. — 2nd ed./NBS Monograph 145 Washington: US Government Print. Office, 1975. Part 1.

5. **Стригаиов А. Р., Одинцова Г. А.** Таблицы спектральных лиий атомов и ионов. М.: Энергоиздат, 1982.

6. **Коидои Е., Шортли Г.** Теория атомных спектров: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1949.

7. **Freeman A. J., Frankel R. H.** Hyperfine Interactions. — N. Y.: Academic Press, 1967.

8. **Fuller G. H.**//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1976. Vol. 5. P. 835—1092.

9. **Arimondo E., Inguscio M., Violino P.**//Rev. Mod. Phys. 1977. Vol. 49. P. 31—75.

10. **King W. H.** Isotope Shifts in Atomic Spectra. N. Y., London: Plenum, 1984.

11. **Heilig K.** Bibliography on experimental optical isotope shifts, 1918 through October 1976//Spectrochim. Acta. 1977. Vol. B32. P. 1—57; Bibliography on experimental optical isotope shifts, November 1976 to October 1981//Spectrochim. Acta. 1982. Vol. B37. P. 417—455.

12. **Bauche J., Champeau R. J.**//Adv. Atom. Mol. Phys. 1976. Vol. 12. P. 39.

13. **Стриганов А. Р., Донцов Ю. П.**//Успехи физ. наук. 1955. Т. 55. С. 315; **Головин А. Ф., Стриганов А. Р.**//Успехи физ. наук. 1967. Т. 93. С. 111.

14. **Хьюбер К. П., Герцберг Г.** Константы двухатомных молекул: Пер. с англ./Под ред. Н. Н. Соболева. М.: Мир, 1984.

15. **Sharp T. E.**//Atomic Data. 1971. Vol. 2. P. 119.

16. **Krupenie P. H.** The band spectrum of carbon monoxide//NSRDS—NBS. Washington: NBS. Vol. 5. 1966.

17. **Lofthus A., Krupenie P. H.**//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1977. Vol. 6. P. 113—307.

18. **Gilmore F. R.**//J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1965. Vol. 5. P. 369.

19. **Krupenie P. H.**//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1972. Vol. 1. P. 423—534.

Глава 33

ЭЛЕКТРО-, МАГНИТО-, ПЬЕЗООПТИЧЕСКИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

М. Е. Бродов, В. П. Яновский

33.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Под действием электромагнитного излучения в материальной среде возникает дипольный момент, атомы среды поляризуются. При малых напряженностях электрического поля излучения E индуцированная поляризация (или электрический дипольный момент единицы объема вещества) связана с E линейной зависимостью

$$P = \chi^{(1)} E,$$

где $\chi^{(1)}$ — линейная оптическая восприимчивость вещества. Линейная поляризация обусловливает существование таких известных оптических явлений, как отражение и преломление света. Линейная восприимчивость связана с показателем преломления соотношением

$$\chi^{(1)} = n^2 - 1.$$

Для больших напряженностей светового поля, таких, которые развиваются в пучках мощных лазеров, наведенная поляризация может быть представлена в виде ряда по степеням напряженности E [1]

$$P = \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots,$$

где $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$ и т. д. — нелинейные восприимчивости вещества, связанные с разнообразными нелинейными оптическими эффектами.

В общем случае в разложении поляризации по степеням поля необходимо учитывать также низкочастотные поля. Большинство нелинейных эффектов связано с членами ряда, пропорциональными квадрату и кубу амплитуды электрического поля. Квадратичная поляризация обусловливает существование таких эффектов, как генерация второй гармоники, оптическое выпрямление, линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) и параметрическая генерация. К эффектам, обязаным своим существованием поляризации, кубичной по полю, относятся генерация третьей гармоники, квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра), двухфотонное поглощение, вынужденное комбинационное рассеяние, вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна и вынужденное релеевское рассеяние.

33.2. ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ ПОККЕЛЬСА)

Линейным электрооптическим эффектом (эффектом Поккельса) называют изменение показателя преломления вещества, пропорциональное приложенному электрическому полю.

Связь между изменениями поляризационных констант вещества $\Delta B_{ij} = \Delta(1/\varepsilon)_{ij}$ (где ε — диэлектрическая проницаемость) и приложенным электрическим полем E_k, В/м, дается электрооптическими коэффициентами r_{ijk}, м/В:

$$\Delta B_{ij} = r_{ijk} E_k,$$

где $i, j, k = 1, 2, 3$. Коэффициенты r_{ijk} образуют полярный тензор третьего ранга, называемый тензором линейного электрооптического эффекта.

В сокращенной записи

$$\Delta B_l = r_{lk} E_k,$$

$l = (ij)$ и в зависимости от ij индекс l пробегает значения от 1 до 6: $1 = (11)$, $2 = (22)$, $3 = (33)$, $4 = (23)$, $5 = (13)$, $6 = (12)$.

Ниже приведены тензоры электрооптических коэффициентов по сингониям в зависимости от типа точечной симметрии кристаллов (в скобках указано число независимых коэффициентов, отличных от нуля).

Триклинная $1 - C_1$:

$$\begin{Bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{Bmatrix} \quad (18) \text{ элементов}$$

Моноклинная:

$2 - C_2$

$$\begin{Bmatrix} 0 & r_{12} & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 \\ 0 & r_{32} & 0 \\ r_{41} & 0 & r_{43} \\ 0 & r_{52} & 0 \\ r_{61} & 0 & r_{63} \end{Bmatrix} \quad 2 \parallel X_2 \quad (8)$$

$m - C_S$

$$\begin{Bmatrix} r_{11} & 0 & r_{13} \\ r_{21} & 0 & r_{23} \\ r_{31} & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & r_{53} \\ 0 & r_{62} & 0 \end{Bmatrix} \quad m \perp X_2 \quad (10)$$

Орторомбическая:

$222 - D_2$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{52} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$mm\,2 - C_{2v}$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Тетрагональная:

$4 - C_4$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} (4)$$

$\bar{4} - S_4$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & -r_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & -r_{51} & 0 \\ r_{51} & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{Bmatrix} (4)$$

$422 - D_4$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} (1)$$

$4mm - C_{4v}$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} (3)$$

$\bar{4}2\,m - D_{2d}$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{Bmatrix} (2 \parallel X_1)$$

Тригональная:

$3 - C_3$

$$\begin{Bmatrix} r_{11} & -r_{22} & r_{13} \\ -r_{11} & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ -r_{22} & -r_{11} & 0 \end{Bmatrix} (6)$$

$32 - D_3$

$$\begin{Bmatrix} r_{11} & 0 & 0 \\ -r_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & -r_{11} & 0 \end{Bmatrix} (2)$$

$3m - C_{3v}$

$$\begin{Bmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{Bmatrix} (4)$$

Гексагональная:

$6 - C_6$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} (4)$$

$\bar{6} - C_{3h}$

$$\begin{Bmatrix} r_{11} & -r_{22} & 0 \\ -r_{11} & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -r_{22} & -r_{11} & 0 \end{Bmatrix} (2)$$

$622 - D_6$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} (1)$$

$6mm - C_{6v}$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} (3)$$

$\bar{6}m2 - D_{3h}$

$$\begin{Bmatrix} 0 & -r_{22} & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{Bmatrix} (m \perp X_1) \quad (1)$$

Кубическая:

$432 - 0$

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} 0$$

23 и $\bar{4}3m - T$ и Td

$$\begin{Bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{Bmatrix} (1)$$

Линейный электрооптический эффект существует лишь в кристаллах, не имеющих центра инверсии. Центр инверсии отсутствует у 21 точечной группы, для которых электрооптический тензор имеет отличающиеся от нуля составляющие.

Значения электрооптических коэффициентов для различных типов кристаллов приведены в табл. 33.1—33.4. Если частота электрического поля, при которой произведены измерения, намного выше или ниже частоты собственного акустического резонанса, то использованы соответственно обозначения (S) и r^S_{ijk} или (T) и r^T_{ijk}. Погрешность измеренных значений r_{ijk} около 15%. В сегнетоэлектриках и других материалах, имеющих фазовый переход, наблюдается сильная зависимость электрооптического коэффициента от температуры, если последняя близка к критической температуре $T_{кр}$. Зависимость r_{ijk} от длины волны света в области прозрачности веществ, как правило, слабая.

Одной из важных характеристик электрооптических кристаллов является полуволновое напряжение $U_{\lambda/2}$, т. е. напряжение, соответствующее набегу разности фаз, равной π, между двумя световыми волнами с взаимно перпендикулярными поляризациями. Эта величина может быть найдена из соотношения

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_3^3 r_{33} - n_1^3 r_{13}} = \frac{\lambda}{n_3^3 r_c},$$

где $r_c = r_{33} - r_{13}(n_1^3/n_3^3)$, м/В; λ — длина волны, м; $U_{\lambda/2}$ — полуволновое напряжение, В, в частном случае одноосных кристаллов [ось z (или ось 3) — оптическая] и при распространении света в перпендикулярном оси z направлении.

Таблица 33.1. Электрооптические свойства кристаллов типа KDP и ADP
Симметрия $\bar{4}2m$ при температуре выше критической $T_{кр}$ [2]

Вещество	$T_{кр}$, К	r_{63}, 10^{-12} м/В	r_{41}, 10^{-12} м/В	ε_3	ε_1
KH_2PO_4 (KDP)	123	(T) 9,37	+8,6	(T) 21	42
		(S) 8,15 $r_{63} < 0$	$r_{41} < 0$	(S) 21	44
KD_2PO_4 (DKDP)	222	(T) 26,4	8,8	(T) 50	—
		(S) 24,0 0,93 r_{63}^T	—	(S) 48	58
KH_2AsO_4 (KDA)	97	(T) 10,9	12,5	(T) 21	54
		—	—	(S) 19	53
KD_2AsO_4 (DKDA)	162	(T) 18,2	—	—	—
RbH_2PO_4 (RDP)	147	(T) 15,5	—	—	—
		(S) 0,91 r_{63}^T	—	—	—
RbH_2AsO_4 (RDA)	110	(T) 13,0	—	(T) 27	41
		—	—	(S) 24	39
RbD_2AsO_4 (DRDA)	178	(T) 21,4	—	—	—
CsH_2AsO_4 (CDA)	143	(T) 18,6	—	—	—
CsD_2AsO_4 (DCDA)		(T) 36,6	—	—	—
$NH_4H_2PO_4$ (ADP)	148*1	(T) —8,5	23,1	(T) 15	56
		(S) 4,1	$r_{41} < 0$	(S) 14	58
$ND_4D_2PO_4$ (DADP)	242*1	(T) 11,9	—	—	—
		(T) 9,2	—	—	—
$NH_4H_2AsO_4$ (ADA)					

*1 Антиферроэлектрический переход.

Таблица 33.2. Электрооптические свойства кристаллов типа ABO_3 [2]

Вещество ($T_{кр}$, К)	Симметрия	r_{i3}, 10^{-12} м/В	r_{ik}, 10^{-12} м/В	λ, мкм	ε_i
$LiNbO_3$ (1470)	3m	(T) $r_{33} = +32{,}2$	(T) $r_{22} = 6{,}8$	0,633	(T) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 78$
		(T) $r_{13} = +10$	(T) $r_{51} = 32$	0,633	(T) $\varepsilon_3 = 32$
		(T) $r_c = 18$			(S) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 43$
		(T) $r_c = 17$	(T) $r_{22} = 5{,}7$	1,15	(S) $\varepsilon_3 = 28$
		(T) $r_c = 16$	(T) $r_{22} = 3{,}1$	3,39	—
		(S) $r_{33} = +30{,}8$	(S) $r_{22} = 3{,}4$	0,633	—
		(S) $r_{13} = +8{,}6$	(S) $r_{51} = +28$	0,633	—
		(S) $r_{33} = 28$	(S) $r_{22} = 3{,}1$	3,39	—
		(S) $r_{13} = 6{,}5$	(S) $r_{51} = 23$	3,39	—
$LiTaO_3$ (890)	3m	(T) $r_c = 22$	—	0,633	(T) $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 = 51$
		(S) $r_{33} = 30{,}3$	(S) $r_{51} = 20$	0,633	(T) $\varepsilon_3 = 45$
		(S) $r_{13} = 7$	(S) $r_{22} \approx 1$	0,633	(S) $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 = 41$
		(S) $r_{33} = 27$	(S) $r_{51} = 15$	3,39	(S) $\varepsilon_3 = 43$
		(S) $r_{13} = 4{,}5$	(S) $r_{22} \approx 0{,}3$	3,39	—
$BaTiO_3$ (395)	4mm	(T) $r_c = 108$	(T) $r_{51} = 1640$	0,546	(T) $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 3600$
		(S) $r_c = 23$	(S) $r_{51} = 820$	0,546	(T) $\varepsilon_3 = 135$
		(S) $r_c = 19$	—	0,633	(S) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2300$
		(S) $r_{33} = 28$	—	0,633	(S) $\varepsilon_3 = 60$
		(S) $r_{13} = 8$	—	0,633	—
$K_3Li_2Nb_5O_{15}$ (693)	4mm	(T) $r_{33} = 78$	—	0,633	(T) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 309$
		(T) $r_{13} = 8{,}9$	—	0,633	(T) $\varepsilon_3 = 100$
$Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$ (~330)	4mm	(T) $r_c = 1410$	T) $r_{51} \parallel 42$	0,633	$\varepsilon_3 = 3400$ (15 МГц)
		(T) $r_{33} = 1340$	—	0,633	—
		(T) $r_{13} = 67$	—	0,633	—
		(S) $r_c = 1090$	—	0,633	—
$Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$	4mm	(T) $r_c = 218$	—	0,633	$\varepsilon_3 = 450$ (15 МГц)
		(15 МГц) $r_c = 96$	—	0,633	—
$Sr_{0,25}Ba_{0,75}Nb_2O_6$ (~520)	4mm	(15 МГц) $r_c = 45$	—	0,633	$\varepsilon_3 = 118$ (15 МГц)
$KTa_xNb_{1-x}O_3$ (~330)	4mm	(T) $r_c = 450$	(T) $r_{51} = +50$	0,633	—
$PbTiO_3$ (765)	4mm	(S) $r_{33} = 5{,}9$	—	0,633	(S) $\varepsilon_3 = 31$
		(S) $r_{13} = 13{,}8$	—	0,633	—

Вещество ($T_{кр}$, К)	Симметрия	r_{l3}, 10^{-12} м/В	r_{lk}, 10^{-12} м/В	λ, мкм	ε_l
$KSr_2Nb_5O_{15}$ (433)	*4mm* или *4*	(*T*) $r_c = 130$	—	0,633	(*T*) $\varepsilon_3 = 1000$ (*T*) $\varepsilon_1 = 1200$
$LiIO_3$ (пироэлектр.)	*6*	(*S*) $r_{33} = +6,4$ (*S*) $r_{13} = +4,1$	(*S*) $r_{41} = 1,4$ (*S*) $r_{51} = +3,3$	0,633 0,633	(*T*) $\varepsilon_3 = 554$ (*T*) $\varepsilon_1 = 65$ (*S*) $\varepsilon_3 = 6,5$ (*S*) $\varepsilon_1 = 8$
$Ba_2NaNb_5O_{15}$ (833)	*mm2*	(*T*) $r_c = 34$ (*T*) $r_{33} = 48$ (*T*) $r_{13} = 15$ (*T*) $r_{23} = 13$ (*S*) $r_{33} = +29$ (*S*) $r_{23} = 8$ (*S*) $r_{13} = 7$	(*T*) $r_{42} = 92$ (*T*) $r_{51} = 90$ — (*S*) $r_{42} = 75$ (*S*) $r_{51} = 88$ — —	0,633 0,633 0,633 0,633 0,633 0,633 0,633	(*T*) $\varepsilon_1 = 235$ (*T*) $\varepsilon_2 = 247$ (*T*) $\varepsilon_3 = 51$ (*S*) $\varepsilon_1 = 222$ (*S*) $\varepsilon_2 = 227$ (*S*) $\varepsilon_3 = 32$ —

Таблица 33.3. **Электрооптические свойства кристаллов типа AB [2]**

Вещество	Симметрия	r_{lk}, 10^{-12} м/В	λ, мкм	ε_i
CuCl	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 3,6$ (*T*) $r_{41} = 3,2$ (*S*) $r_{41} = +2,35$ (*S*) $r_{41} = +2,20$	0,633 10,6 0,633 3,39	(*S*) $\varepsilon = 7,5$ — — —
CuBr	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 0,85$	0,525	—
ZnO	*6mm*	(*S*) $r_{33} = +2,6$ (*S*) $r_{13} = -1,4$ (*S*) $r_{33} = +1,9$ (*S*) $r_{13} = +0,96$	0,633 0,633 3,39 3,39	(*S*) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 8,15$ $\approx \varepsilon_3$ — —
ZnS	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 1,2$ (*T*) $r_{41} = 2,1$ (*S*) $r_{41} = 1,6$ (*S*) $r_{41} = 1,4$	0,4 0,65 0,633 3,39	(*T*) $\varepsilon = 16$ (*S*) $\varepsilon = 12,5$ (*T*, *S*) $\varepsilon = 8,3$ —
CdS	*6mm*	(*T*) $r_c = 4$ (*T*) $r_{51} = 3,7$ (*T*) $r_c = 5,5$ (*S*) $r_{33} = 2,4$ (*S*) $r_{13} = 1,1$	0,589 0,589 10,6 0,633 0,633	(*T*) $\varepsilon_3 = 10,33$ (*T*) $\varepsilon_1 = 9,35$ (*S*) $\varepsilon_1 = 9,02$ (*S*) $\varepsilon_3 = 9,53$ —
CdSe	*6mm*	(*S*) $r_{33} = 4,3$ (*S*) $r_{13} = 1,8$	3,39 3,39	(*T*) $\varepsilon_3 = 10,65$ (*T*) $\varepsilon_1 = 9,70$ (*S*) $\varepsilon_1 = 9,33$ (*S*) $\varepsilon_3 = 10,20$
CdTe	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 6,8$ (*T*) $r_{41} = 6,8$ (*T*) $r_{41} = 5,5$ (*T*) $r_{41} = 5,0$	3,39 10,6 23,35 27,95	— (*S*) $\varepsilon = 9,4$ — —
HgS	*32*	(*S*) $r_{11} = 3,1$ (*S*) $r_{41} = 1,4$ (*S*) $r_{11} = 4,2$ (*S*) $r_{41} = 2,4$	0,633 0,633 3,39 3,39	— — — —
ZnS	*6mm*	(*S*) $r_{33} = 1,8$ (*S*) $r_{33} = 1,7$ (*S*) $r_{13} = 0,9$	0,633 3,39 0,633	(*T*) $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 8,7$ (*S*) $\varepsilon_1 = 8,7$ —
ZnSe	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 2,0$ (*S*) $r_{41} = 2,0$ (*T*) $r_{41} = 2,2$	0,546 0,633 10,6	(*T*) $\varepsilon = 9,1$ (*S*) $\varepsilon = 9,1$ —

Вещество	Симметрия	r_{lk}, 10^{-12} м/В	λ, мкм	ε_l
ZnTe	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 4{,}45 \div 3{,}95$	0,59; 0,69	(*T*) $\varepsilon = 10{,}1$
		(*T*) $r_{41} = 1{,}4$	10,6	(*S*) $\varepsilon = 10{,}1$
		(*S*) $r_{41} = 4{,}3$	0,633	—
		(*S*) $r_{41} = 3{,}2$	3,39	—
GaP	$\bar{4}3m$	(*S*) $r_{41} = -1{,}07 \div (-0.97)$	0,56; 3,39	(*S*) $\varepsilon = 12$
				(*S*) $\varepsilon = 10$
GaAs	$\bar{4}3m$	(*S*) $r_{41} = 1{,}2$	0,9	(*S*) $\varepsilon = 13{,}2$
			1,08	(*S*) $\varepsilon = 12{,}3$
		(*S*) $r_{41} = -1{,}5$	3,39	(*T*) $\varepsilon = 12{,}5$
		(*S* + *T*) $r_{41} = 1{,}2 \div 1{,}6$	1,0; 3,0	—
		(*T*) $r_{41} = 1{,}0 \div 1{,}2$	4,0; 12,0	—
		(*T*) $r_{41} = 1{,}6$	10,6	—
		(*S*) $r_{41} = 1{,}5$	10,6	—

Таблица 33.4. **Электрооптические свойства кристаллов различных типов [2]**

Вещество	Симметрия	r_{lk}, 10^{-12} м/в	λ, мкм	n_l (λ, мкм)
$Bi_4(GeO_4)_3$	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 1{,}03$	0,45—0,62	$n_0 = 2{,}07$
$(CH_2)_6N_4$ (HMT — гексаметилентетрамин)	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 0{,}71 \div 0{,}8$	0,546	$n_0 = 1{,}591$ (0,589)
		(*T*) $r_{41} = 0{,}78$	0,633	$n_0 = 1{,}594$ (0,633)
		(*S*) $r_{41} < 0{,}14$	0,633	—
Гайнит (минерал)	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} < 0{,}04$	0,633	$n_0 = 1{,}496$
$K_2Mg_2(SO_4)_3$	23	(*T*) $r_{41} = 0{,}40$	0,546	$n_0 = 1{,}535$ (0,589)
$(NH_4)_2Cd_2(SO_4)_3$	23	(*T*) $r_{41} = 0{,}70$	0,546	$n_0 = 1{,}606$ (0,589)
$(NH_4)_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(*T*) $r_{41} = 0{,}53$	0,546	$n_0 = 1{,}57$ (0,589)
$Tl_2Cd_2(SO_4)_3$	23	(*T*) $r_{41} = 0{,}37$	0,546	$n_0 = 1{,}730$ (0,589)
$K_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(*T*) $r_{41} = 2{,}0$	0,453—0,642	1,62 (0,45 — 0,65)
$Rb_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(*T*) $r_{41} = 1{,}9$	0,453—0,642	1,60 (0,45—0,65)
$Tl_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(*T*) $r_{41} = 2{,}1$	0,453—0,642	1,80 (0,45—0,65)
$K_2Ni_2(SO_4)_3$	23	(*T*) $r_{41} = 1{,}0$	0,453—0,642	1,70 (0,45—0,65)
$NaClO_3$	23	(*T*) $r_{41} = 0{,}4$	0,589	$n_0 = 1{,}515$
$Na_3SbS_4 \cdot 9H_2O$	23	(*T*) $n_1^3 r_{41} = 5{,}66$	0,42	—
		(*T*) $n_1^3 r_{41} = 5{,}62$	1,08	—
Уранилацетат натрия	23	(*T*) $r_{41} = 0{,}87$	0,546	$n_0 = 1{,}507$ (0,546)
$LiKSO_4$	6	(*T*) $r_c = 1{,}6$	0,546	$n_3 \approx n_1 = n_2 = 1{,}474$ (0,546)
$LiNaSO_4$	3*m*	(*T*) $r_{22} < 0{,}02$	0,546	$\begin{cases} n_3 = 1{,}495 \\ n_1 = n_2 = 1{,}490 \end{cases}$
Турмалин	3*m*	(*T*) $r_{22} = 0{,}3$	0,589	$n_3 = 1{,}65$
		(*S*) $r_{33} = r_{13} = 1{,}7$	0,633	$n_1 = n_2 = 1{,}63$
		(*T*) $r_{22} = 0{,}92$	0,50	$n_1 = n_2 = 1{,}643$ (0,50)
$Na_3Li(CrO_4)_2 \cdot 6H_2O$	3*m*	(*T*) $r_{22} = 0{,}82$	0,52	$n_1 = n_2 = 1{,}635$ (0,52)
		(*T*) $r_{22} = 0{,}77$	0,60	$n_1 = n_2 = 1{,}612$ (0,60)
Ag_3AsS_3 (прустит)*1	3*m*	(*S*) $\left(n_1^3 r_{13} - n_3^3 r_{33}\right) = 70$	0,633	$n_1 = 3{,}02$ (0,633)
		(*S*) $n_1^3 r_{22} = 29$	0,633	$n_3 = 2{,}74$ (0,633)
$K_2S_2O_6$	32	(*T*) $r_{11} = 0{,}26$	0,546	$\begin{cases} n_3 = 1{,}1518 \\ n_1 = n_2 = 1{,}456 \end{cases}$
$Cs_2C_4H_4O_6$	32	(*T*) $r_{11} = 1{,}0$	0,546	$\begin{cases} n_3 = 1{,}546 \\ n_1 = n_2 = 1{,}564 \end{cases}$
$SrS_2O_6 \cdot 4H_2O$	32	(*T*) $r_{11} = 0{,}1$	0,546	$\begin{cases} n_3 = 1{,}528 \\ n_1 = n_2 = 1{,}532 \end{cases}$
Se*2	32	(*S*) $n_1^3 r_{11} = 89$	1,15	$\begin{cases} n_1 = 2{,}737\ (1{,}15) \\ n_3 = 3{,}573 \end{cases}$
		(*S*) $r_{11} \sim 2{,}5$	10,6	$\begin{cases} n_1 = 2{,}64\ (10{,}6) \\ n_3 = 3{,}41 \end{cases}$

Вещество	Симметрия	r_{lk}, 10^{-12} м/В	λ, мкм	n_i (λ, мкм)
SiO_2 (кварц)*3	*32*	$(T)\ r_{11} = -0,47$	0,409—0,605	$n_3 = 1,555$ (0,546)
		$(T)\ r_{11} = 0,20$	0,633	$n_1 = n_2 = 1,546$ (0,546)
		$(S)\ r_{11} = 0,23$	0,633	—
		$(S)\ r_{11} = 0,29$	0,633	—
		$(S)\ r_{11} = 0,174$	0,633	—
$(C_6H_{12}O_6)_2\ NaBr \cdot H_2O$	*32*	$(T)\ r_{11} = 0,1$	0,546	$n_3 = 1,560$ (0,546)
$AgGaS$*4	$\bar{4}2m$	$(T)\ r_{63} = 3,0$	0,633	$n_1 = n_2 = 2,55$ (0,633)
		$(T)\ r_{41} = 4,0$	0,633	$n_3 = 2,50$
$Gd_2(MoO_4)_3$*5	$\bar{4}2m$	$(T)\ n_1^3 r_{63} = 17$ (450 K)	0,633	$n_1 = n_2 = 1,528$
				$n_1 \approx n_2 = 1,848$ (0,633)
	mm2	$(T)\ n_1^3 r_{13} - n_3^3 r_{33} = 17,5$ (300 K)	0,633	$n_3 = 1,901$ (0,633)
$CdGa_2S_4$	$\bar{4}$	$(T)\ r_{13} = 0,37$	0,50	$n_1 = n_2 = 2,3$ (0,50)
		$r_{63} = 3,5$	0,50	
$(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$	*222*	$(T)\ r_{41} = 230$	0,633	$n_1 = 1,437$ (0,65)
		$(T)\ r_{52} = 330$	0,633	$n_2 = 1,547$
		$(T)\ r_{63} = 250$	0,633	$n_3 = 1,590$
		$(T)\ r \ll 250$	0,633	—
		$(S)\ r_{63} \approx 2$	0,633	—
$NaNO_2$*6	*mm2*	$(T)\ r_{22} - \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^3 r_{32} = 4,1$	0,546	$n_1 = 1,347$ (0,546)
		$(T)\ r_{32} - \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^3 r_{12} = 4,2$	0,546	$n_2 = 1,415$
		$(T)\ r_{22} - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 r_{12} = 0,6$	0,546	$n_3 = 1,661$
		$(T)\ r_{43} = -1,9$	0,546	—
		$(T)\ r_{61} = -3,0$	0,546	—
$C(CH_2OH)_4$	*2*	$(T)\ r_{52} = 1,45$	0,46—0,70	$n_1 = 1,528$
		$(T)\ \lvert r_{12} - r_{32} \rvert = 0,7$	0,46—0,70	$n_2 \approx n_3 = 1,56$
$Ca_2Nb_2O_7$	*2*	$(T)\ \left\lvert r_{22} - \frac{n_1^3}{n_2^3} r_{12} \right\rvert = 12$	0,63	$n_1 = 1,97$
		$(T)\ \left\lvert r_{22} - \frac{n_3^3}{n_2^3} r_{32} \right\rvert = 14$	0,63	$n_2 = 2,16$
		$(S)\ \left\lvert r_{22} - \frac{n_3^3}{n_2^3} r_{32} \right\rvert = 13$	0,63	$n_3 = 2,17$
		$(S)\ r_{12} = 6,7$	0,63	
		$(S)\ r_{22} = 25,5$	0,63	
		$(S)\ r_{32} = 6,4$	0,63	
		$(S)\ r_{41} = 2,7$	0,63	
		$(S)\ r_{52} < 0,6$	0,63	
		$(S)\ r_{63} = 0,9$	0,63	

*1 Прозрачен от 0,6 до 13 мкм; $\varepsilon_1 \cong \varepsilon_3 = 20$; $\rho = 10^5$ Ом · см.
*2 Граница прозрачности около 8 мкм; $\varepsilon_1 \approx 8$.
*3 $r_{11} < 0$ и $r_{41} > 0$ в левовращающем кварце.
*4 $(S)\ \varepsilon_3 = 14$, $(S)\ \varepsilon_1 = 10$.
*5 $T_C = 432$ K, $\varepsilon_3 = 8$.
*6 x_2 принято полярной осью, переход в *mmm* при 432 K: $(S)\ \varepsilon_1 = 5$, $\varepsilon_2 = 4$, $\varepsilon_3 = 8$.

33.3. МАГНИТНОЕ ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ (ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ)

Поворот плоскости поляризации света, распространяющегося в среде, находящейся во внешнем магнитном поле, называют линейным магнитооптическим эффектом или эффектом Фарадея. В пара- и диамагнитных материалах угол поворота плоскости поляризации φ_F, мин, дается соотношением

$$\varphi_F = VHl\cos\gamma, \qquad (33.1)$$

где V — постоянная Верде, $\frac{\text{мин}}{(\text{А/м})\,\text{м}} = \frac{\text{мин}}{\text{А}}$, зависящая от природы вещества, частоты света и температуры; H — напряженность приложенного магнитного поля, А/м; l — длина пути луча в веществе, м; γ — угол между направлением приложенного поля и направлением распространения луча, град.

В ферромагнитных материалах напряженность магнитного поля в выражении для φ_F заменяется намагниченностью M, Тл, а постоянная Верде — постоянной Купдта K, град/(Тл·см). В таблицах обычно приводят характерное для ферромагнетиков значение параметра вращения при насыщенной намагниченности M_S, Тл, определяемое как удельное фарадеевское вращение плоскости поляризации M_S для света, распространяющегося вдоль вектора намагниченности M_S, т. е.

$$F = KM_S, \qquad (33.2)$$

где F — удельное фарадеевское вращение, град/см.

При рассмотрении магнитооптических характеристик веществ необходимо учитывать ослабление излучения при распространении его во вращающей плоскость поляризации среде. Для характеристики «качества» различных магнитоактивных сред служит величина $2F/\alpha$, где α — коэффициент ослабления или поглощения в законе $I = I_0 \exp(-\alpha l)$.

К соотношениям (33.1) и (33.2) применимо обычное правило правой руки. Так, положительные φ_F и F соответствуют случаю, когда свет распространяется вдоль направления магнитного поля и плоскость поляризации вращается по часовой стрелке.

В табл. 33.5—33.7 — приняты следующие обозначения:

T_C — температура Кюри;
T_t — температура фазового перехода;
T_N — температура Нееля;
T_{co} — температура компенсации;
M_S, Тл — индукция насыщения при 0 К;
F, град/см — удельное фарадеевское вращение;
α, $см^{-1}$ — коэффициент поглощения;
$2F/\alpha$, град — характеристики качества;
λ, нм — длина волны излучения;
ОЦК — объемноцентрированный куб;
ГПУ — гексагональная плотная упаковка;
ГЦК — гранецентрированный куб.

Таблица 33.5. **Характеристики ферромагнитных, ферримагнитных и антиферромагнитных веществ [1]**

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, К	M_S, Тл	F, град/см	α, $см^{-1}$	$2F/\alpha$, град	T, К	λ, нм
Металлы переходной группы:								
Fe	ОЦК	$T_{кр}$=1043	0,1735	$3{,}5\cdot10^5$	$7{,}6\cdot10^5$	0,92	300	546
				$5{,}1\cdot10^5$	$3{,}2\cdot10^5$	3,1	300	1000
				$4{,}4\cdot10^5$	$6{,}5\cdot10^5$	1,4	300	500
				$6{,}5\cdot10^5$	$5\cdot10^5$	2,6	300	1000
				$7\cdot10^5$	$4{,}2\cdot10^5$	3,3	300	1500
				$7\cdot10^5$	$3{,}5\cdot10^5$	4,0	300	2000
Co	ГПУ	$T_{кр}$=1390	0,145	$3{,}6\cdot10^5$	$8{,}5\cdot10^5$	0,85	300	546
				$2{,}9\cdot10^5$	—	—	300	500
				$5{,}5\cdot10^5$	$6{,}1\cdot10^5$	1,8	300	1000
				$5{,}5\cdot10^5$	$4{,}5\cdot10^5$	2,4	300	1500
				$4{,}8\cdot10^5$	$3{,}6\cdot10^5$	2,7	300	2000
Ni	ГЦК	$T_{кр}$=633	0,051	$0{,}99\cdot10^5$	$8{,}0\cdot10^5$	0,25	300	546
				$7{,}2\cdot10^5$	$4{,}2\cdot10^5$	3,4	300	4000
				$0{,}8\cdot10^5$	—	—	300	500
				$2{,}6\cdot10^5$	$5{,}8\cdot10^5$	0,9	300	1000
				$1{,}5\cdot10^5$	$4{,}8\cdot10^5$	0,6	300	1500
				$1\cdot10^5$	$4{,}1\cdot10^5$	0,25	300	2000
Ni*1 (монокристалл)				$0{,}79\cdot10^5$	—	—	300	546
				$0{,}88\cdot10^5$	—	—	300	546
				$0{,}97\cdot10^5$	—	—	300	546
Бинарные компаунды и сплавы:								
пермаллой	ГЦК (Ni:Fe, %, 82:18)	$T_{кр}$=803	0,085	$1{,}2\cdot10^5$	$6\cdot10^5$	0,4	300	500
CrTe	NiAs	$T_{кр}$=334	0,0081	$0{,}5\cdot10^5$	$2{,}0\cdot10^5$	0,5	300	550
				$0{,}4\cdot10^5$	$1{,}2\cdot10^5$	0,7	300	900
				$0{,}4\cdot10^5$	$0{,}6\cdot10^5$	1,3	300	2500
MnAs	NiAs	$T_{кр}$=313	—	$0{,}44\cdot10^5$	$5{,}0\cdot10^5$	0,174	300	500
				$0{,}49\cdot10^5$	$4{,}9\cdot10^5$	0,200	300	600
				$0{,}59\cdot10^5$	$4{,}6\cdot10^5$	0,26	300	700
				$0{,}78\cdot10^5$	$4{,}5\cdot10^5$	0,34	300	800
				$0{,}62\cdot10^5$	$4{,}4\cdot10^5$	0,28	300	900

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, К	M_S, Тл	F, град/см	α, $см^{-1}$	$2F/\alpha$, град	T, К	λ, нм
MnBi	NiAs (низкотемпературная фаза)	$T_{кр} = 639$	0,061 (0,060 при 300 К)	$4{,}2 \cdot 10^5$	$6{,}1 \cdot 10^5$	1,4	300	450
				$5{,}0 \cdot 10^5$	$5{,}8 \cdot 10^5$	1,7	300	500
				$7{,}0 \cdot 10^5$	$5{,}1 \cdot 10^5$	2,8	300	600
				$7{,}7 \cdot 10^5$	$4{,}5 \cdot 10^5$	3,4	300	700
				$7{,}6 \cdot 10^5$	$4{,}3 \cdot 10^5$	3,5	300	800
				$7{,}5 \cdot 10^5$	$4{,}2 \cdot 10^5$	3,6	300	900
				$7{,}4 \cdot 10^5$	$4{,}1 \cdot 10^5$	3,6	300	1000
	Высокотемпературная фаза	$T_{кр} = 453$	(0,044 при 300 К)	$3{,}2 \cdot 10^5$	$6{,}1 \cdot 10^5$	1,0	300	450
				$3{,}3 \cdot 10^5$	$5{,}8 \cdot 10^5$	1,1	300	500
				$3{,}3 \cdot 10^5$	$5{,}1 \cdot 10^5$	1,3	300	600
				$3{,}3 \cdot 10^5$	$4{,}7 \cdot 10^5$	1,4	300	700
				$3{,}3 \cdot 10^5$	$4{,}5 \cdot 10^5$	1,4	300	800
				$3{,}2 \cdot 10^5$	$4{,}4 \cdot 10^5$	1,4	300	900
				$3{,}2 \cdot 10^5$	$4{,}4 \cdot 10^5$	1,4	300	1000
FeRh	—	$T_p = 333$	—	$0{,}9 \cdot 10^5$	$3{,}3 \cdot 10^5$	0,56	348	700
Ni + Fe	100:0		0,048	$1{,}2 \cdot 10^5$	$7{,}05 \cdot 10^5$	0,34	300	632,8
	90:10		0,067	$1{,}6 \cdot 10^5$	$7{,}14 \cdot 10^5$	0,45	300	632,8
	80:20		0,086	$2{,}2 \cdot 10^5$	$7{,}10 \cdot 10^5$	0,62	300	632,8
	70:30		0,103	$2{,}7 \cdot 10^5$	$7{,}0 \cdot 10^5$	0,77	300	632,8
	60:40		0,119	$2{,}9 \cdot 10^5$	$7{,}54 \cdot 10^5$	0,77	300	632,8
	50:50		0,127	$2{,}8 \cdot 10^5$	$8{,}13 \cdot 10^5$	0,69	300	632,8
	40:60		0,115	$2{,}2 \cdot 10^5$	$8{,}17 \cdot 10^5$	0,54	300	632,8
	30:70		0,064	—	$8{,}13 \cdot 10^5$	—	300	632,8
	20:80		0,154	$3{,}3 \cdot 10^5$	$8{,}1 \cdot 10^5$	0,81	300	632,8
	10:90		0,166	$3{,}6 \cdot 10^5$	$8{,}13 \cdot 10^5$	0,88	300	632,8
	0:100		0,172	$3{,}5 \cdot 10^5$	$8{,}13 \cdot 10^5$	0,86	300	632,8
	35:65		0,099	$2{,}1 \cdot 10^5$	$7{,}7 \cdot 10^5$	0,55	300	400—700
Ферриты:								
$Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4$	—	—	—	—440	150	6	300	1500
				—190	135	3	300	2000
				+10	85	0,2	300	3000
				+85	60	3	300	4000
				+110	44	5	300	5000
				+125	44	6	300	6000
				+135	80	3	300	7000
$MgFe_2O_4$	—	—	—	—60	100	1	300	2500
				—40	40	2	300	3000
				0	12	0	300	4000
				+30	4	15	300	5000
				+35	6	11	300	6000
				+50	13	8	300	7000
$CoFe_2O_4$	Шпинель	$T_N = 793$	0,0392	$2{,}75 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^4$	0,5	300	286
				$3{,}8 \cdot 10^4$	$14 \cdot 10^4$	0,5	300	330
				$3{,}6 \cdot 10^4$	$17 \cdot 10^4$	0,4	300	400
				$1{,}3 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^4$	0,2	300	500
				$-2{,}5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	0,8	300	660
$NiFeO_4$	Шпинель	$T_N = 858$	0,0267	$2{,}0 \cdot 10^4$	$5{,}9 \cdot 10^4$	0,7	300	286
				$2{,}4 \cdot 10^4$	$7{,}4 \cdot 10^4$	0,7	300	330
				$-0{,}75 \cdot 10^4$	$16 \cdot 10^4$	0,09	300	400
				$-1{,}0 \cdot 10^4$	10^5	0,2	300	500
				$+0{,}12 \cdot 10^4$	10^4	0,2	300	660
				—120	38	6	300	1500
				+40	32	2,5	300	2000
				+75	15	10	300	3000
				+110	15	15	300	4000
				+110	32	7	300	5000

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, К	M_S, Тл	F, град/см	α, см$^{-1}$	$2F/\alpha$, град	T, К	λ, нм
YIG	Гранат	$T_N = 560$	0,020	240	0,069	$7 \cdot 10^3$	300	1200
				2400	1500	3,2	300	555
				1750	1350	2,6	300	588
				1250	1400	1,8	300	625
				800	1150	1,4	300	667
				900	670	2,7	300	715
				750	450	3,3	300	770
				175	$<0,06$	$>3 \cdot 10^3$	300	1500
$BaFe_{12}O_{19}$	Гексагональная	—	—	—50	38	3	300	2000
				+75	20	7,5	300	3000
				+130	13	20	300	4000
$BaFe_{12}O_{19}$	Гексагональная			+150	20	15	300	5000
				+160	20	16	300	6000
				+165	22	15	300	7000
$Ba_2Zn_2Fe_{12}O_{19}$	Гексагональная	—	—	+90	120	1,5	300	5000
				+80	70	2	300	6000
				+75	65	2	300	7000
				+70	85	2	300	8000
GdIG	Гранат	$T_N = 564$	0,058	—2000	6000	0,6	300	500
		$T_{co} = 286$		—1050	900	2,3	300	600
				—450	400	2,3	300	700
				—300	100	6	300	800
				—220	230	1,9	300	900
				—80	70	2,3	300	1000
Фториды:								
$RbNi_{0,75}Co_{0,25}F_3$[*2]	Перовскит	$T_N = 109$	—	180	9	40	77	600
$RbFeF_3$*	Перовскит	$T_p = 102$	—	3400	7	900	82	300
				1600	3	1100	82	400
				950	4,6	410	82	500
				620	1,5	830	82	600
				420	1,2	700	82	700
				300	2,5	240	82	800
$RbNiF_3$[*3]	Перовскит	$T_N = 139$	0,0099	360	35	20	77	450
				210	12	35	77	500
				70	10	14	77	600
				—70	30	5	77	700
				310	70	9	77	800
				100	60	3	77	900
				75	25	6	77	1000
Тригалиды:								
$CrCl_3$	BiI_3	$T_K = 16,8$	0,031	2000	200	20	1,5	410
				—500	300	3	1,5	450
				—1000	70	30	1,5	590
$CrBr_3$	BiI_3	$T_K = 32,5$	0,0270	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^3$	200	—	478
				$1,6 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^4$	23	1,5	500
CrI_3	BiI_3	$T_K = 68$	0,0214	$1,1 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^3$	35	1,5	970
				$0,8 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^3$	53	1,5	1000
Халькогениды:								
EuO	NaCl	$T_C = 69$	0,189	$-1,0 \cdot 10^5$	$0,5 \cdot 10^4$	40	5	1100
				$3,2 \cdot 10^5$	$7,5 \cdot 10^4$	8,5	5	800
				$5 \cdot 10^5$	$9,7 \cdot 10^4$	10	5	700
				$3,6 \cdot 10^5$	$9,7 \cdot 10^4$	7,5	6	600
				$0,5 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^4$	1,3	5	500
				$3 \cdot 10^4$	$>0,5$	$\sim 10^5$	20	2500
				660	$>1,0$	~ 1300	20	10 600

Продолжение табл. 33.5

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, K	M_S, Тл	F, град/см	α, см$^{-1}$	$2F/\alpha$, град	T, K	λ, нм
EuS	NaCl	$T_C = 16{,}3$	—	$-1{,}6\cdot10^5$	~0	—	6	825
				$-9{,}6\cdot10^5$	$3{,}3\cdot10^3$	58	6	690
				$5{,}5\cdot10^5$	$1{,}2\cdot10^5$	92	6	563
				$5{,}1\cdot10^5$	$1{,}0\cdot10^5$	10	6	495
EuSe	NaCl	$T_C = 7$	0,105	$1{,}45\cdot10^5$	80	3600	4,2	750
				$1{,}17\cdot10^5$	70	3340	4,2	775
				$0{,}95\cdot10^5$	60	3170	4,2	800

Продолжение табл. 33.5

Вещество	M_S, 10^{-8} Тл	F, град/см, для длин волн, нм						α, см$^{-1}$, для $\lambda = 1250$ нм
		620	800	1000	1200	1400	1600	
Ортоферриты[*4]:								
[3]								
$DyFeO_3$[*5]	1,02	4300	1700	1100	670	480	370	~40
$YFeO_3$[*5]	0,84	3000	1200	670	520	370	260	~10

[*1] Направление световой волны соответственно вдоль [100], [110] и [111].
[*2] Имеется сильное естественное двулучепреломление.
[*3] Измерено вдоль оси c.
[*4] Все ортоферриты обладают сильным естественным двулучепреломлением.
[*5] Оптические оси лежат в плоскости (100) и с осью c составляют угол, изменяющийся от 52 до 46° при изменении длины волны от 620 до 1600 нм.

Таблица 33.6. **Характеристики парамагнитных веществ [2]**

Кристалл	Ион	Концентрация, %	T, К	λ, нм	V, мин/А	α, см$^{-1}$	V/α
Ионы редких земель в кристаллах:							
CaF_2	Eu^{2+}	3	4,2	430	36	11,5	3,1
			4,2	440	28	1,8	15
CaF_2	Nd^{3+}	2,9	4,2	426,4	0,24	5	0,048
			300	450	5,7	20	0,28
EuF_2	Eu^{2+}	—	300	500	3,3	7	0,47
			300	550	2,0	6	0,34
			300	600	1,4	5,5	0,25
			300	650	1,0	5	0,2

Вещество	T, К	λ, нм	V, мин/А	λ, нм, при α	
				10^4 см$^{-1}$	1 см$^{-1}$
Перовскиты (оксиды):					
$SrTiO_3$	298	413	0,98	368	413
		496	0,39	—	—
		620	0,18	—	—
		826	0,083	—	—
$BaTaO_3$	403	427	1,2	380	446
		496	0,48	—	—
		620	0,23	—	—
		826	0,09	—	—
$KTaO_3$	296	352	0,55	327	370
		413	0,24	—	—
		496	0,12	—	—
		620	0,064	—	—
		826	0,028	—	—

Вещество	T, К	V, мин/А, для λ, нм							
		405	450	480	520	546	578	635	670
Редкоземельные гранаты:									
TbAlG*[1]	300	—2,797	—1,967	—1,621	—1,306	—1,146	—0,989	—0,779	—0,681
	77	—	—	—	—4,304	—3,834	—3,271	—2,523	—2,281
	4,2	—	—128	—104,9	—81,43	—73,32	—67,57	—60,81	—35,93
	1,45	—	—252,5	—216,8	—175,0	—157,2	—139,8	—122,5	—117,4
DyAlG	300	—1,559	—1,18	—1,01	—0,838	—0,744	—0,651	—0,516	—0,451
HoAlG	300	—0,891	—0,402	—0,327	—0,421	—0,382	—0,376	—	—0,259
ErAlG	300	—0,237	—0,302	—0,193	—0,204	—0,197	—0,182	—0,132	—0,112
TmAlG	300	+0,19	+0,129	+0,117	+0,095	+0,087	+0,074	+0,0603	—
YbAlG	298	0,361	0,27	0,234	0,176	0,167	0,146	0,118	—
	77	0,902	0,678	0,604	0,494	0,43	0,379	0,30	—

*[1] $\alpha \approx 0{,}2 \div 0{,}6$ см$^{-1}$ при T=300 К.

Таблица 33.7. **Магнитооптические свойства стекол [2]**

Массовое содержание, %				V, мин/А, при $T = 300$ К для λ, им									
Eu^{2+}	EuO	Al_2O_3	B_2O_3	406	435	450	500	550	600	650	700	750	800
Европиевое стекло													
12,9	14,4	15,3	70,2	—0,795	—0,428	—0,354	—0,204	—0,131	—0,095	—0,077	—0,062	—0,053	—0,040
14,7	16,5	11,2	72,0	—0,940	—0,503	—0,411	—0,25	—0,165	—0,113	—0,088	—0,069	—0,058	—0,048
17,9	20,0	13,4	66,2	—1,48	—0,848	—0,66	—0,374	—0,261	—0,187	—0,142	—0,114	—0,05	—0,075
26,7	29,9	11,0	60,0	—	—1,60	—1,23	—0,657	—0,461	—0,324	—0,24	—0,198	—0,162	—0,138
30,5	34,2	14,8	50,7	—	—	—3,2	—1,58	—0,906	—0,601	—0,46	—0,337	—0,283	—0,219

Боратное стекло с ионами редкоземельных элементов

Состав*[1]		V, мин/А, при $T = 300$ К для λ, им									
R	x	405	436	480	500	520	546	578	600	635	670
La	3,04	0,054	0,045	0,036	0,033	0,029	0,028	0,024	0,023	0,020	0,018
Pr — La	5,44	—0,477	—0,386	—0,290	—0,276	—0,253	—0,224	—0,192	—0,183	—0,161	—0,138
Nd — La	5,41	—0,226	—0,185	—0,151	—0,139	—0,121	—0,118	—0,126	—0,074	—0,070	—0,058
Sm — La	4,97	0,040	0,038	0,031	0,030	0,028	0,024	0,021	0,020	0,018	0,013
Eu — La	4,69	—0,101	—0,075	—0,048	—0,041	—0,036	—0,030	—0,024	—0,020	—0,018	—0,015
Gd — La	4,71	0,040	0,033	0,030	0,028	0,026	0,025	0,023	0,021	0,019	0,016
Tb — La	4,73	—0,643	—0,526	—0,401	—0,362	—0,329	—0,291	—0,258	—0,234	—0,210	—0,178
Dy — La	4,88	—0,548	—0,454	—0,376	—0,343	—0,309	—0,276	—0,242	—0,222	—0,200	—0,173
Ho — La	4,36	—0,338	—0,317	—0,155	—0,165	—0,141	—0,161	—0,131	—0,121	—	—0,093
Er — La	4,50	—0,117	—0,098	—0,085	—0,103	—	—0,057	—0,053	—0,050	—0,044	—0,043
Tm — La	4,75	0,075	0,058	0,049	0,043	0,039	0,038	0,029	0,026	0,023	0,020
Yb — La	8,58	0,144	0,118	0,092	0,083	0,075	0,068	0,058	0,054	0,046	0,041
Tb — Pr	4,99	—1,18	—0,987	—0,704	—0,673	—0,614	—0,548	—0,477	—0,437	—0,384	—0,333
Dy — Pr	4,63	—1,07	—	—	—0,624	—0,584	—0,519	—0,450	—0,417	—0,364	—0,317
Pr	2,56	—1,06	—0,812	—0,592	—0,603	—0,543	—0,490	—0,420	—0,398	—0,340	—0,305

Алюмосиликатное стекло

Состав (массовое содержание, %)	*V*, мин/А, для λ, нм										*T*, К
	365	404	546	650	700	800	900	1100	1200	1300	
Празеодимовое											
Rr_6O_{11} (58) SiO_2 (25) Al_2O_3 (12) MgO (4) Sb_2O_3 (1)	—1,31 —4,30	—0,955 —3,15	—0,440 —1,46	—0,299 —0,980	—0,249 —0,823	—0,185 0,613	—0,141 —0.466	—0,084 —0,291	—0,064 —0,230	—0,044 —0,173	295 77,4
Диспрозиевое											
Dy_2O_3 (58) SiO (25) Al_2O_3 (12) MgO (4) Sb_2O_3 (1)	—1,11 —4,20	—0,849 —3,24	—0,422 —1,61	—0,290 —0,109	—0,237 —0,910	— —	— —	— —	— —	— —	295 77,4
Тербиевое											
Tb_4O_7 (58) SiO_2 (25) Al_2O_3 (12) MgO (4) Sb_2O_3 (1)	—1,4 —5,45	—1,08 —4,02	—0,490 —1,78	—0,332 —0,123	—0,276 —1,01	—0,200 —0,744	—0,151 —0,565	—0,093 —0,353	—0,074 —0,283	—0,059 —0,229	295 77,4

Состав*2		*V*, мин/А, при $T = 300$ К для λ, им									
R	*x*	405	436	480	500	520	546	578	600	635	670
Фосфатное с ионами редкоземельных элементов (R)*1											
La	—	0,046	0,038	0,030	0,028	0,025	0,023	0,019	0,018	0,016	—
Ce	2,67	—0,844	—0,641	—0,460	—0,410	—0,361	—0,318	—0,273	—0,147	—0,217	—0,188
Pr	3,09	—0,562	—0,417	—0,356	—0,388	—0,296	—0,261	—0,229	—0,214	—0,188	—0,166
Nd	2,92	—0,314	—0,263	—0,210	—0,195	—0,171	—0,168	—0,118	—0,100	—0,100	—0,089
Sm	2,87	0,033	0,030	0,025	0,025	0,021	0,019	0,018	0,015	0,014	0,013
Eu	2,93	—0,031	—0,021	—0,013	—0,008	—0,008	—0,006	—0,005	—0,004	—0,0025	—0,0025
Gd	3,01	0,023	0,019	0,018	0,015	0,015	0,014	0,014	0,013	0,011	0,011
Tb	2,94	—0,704	—0,575	—0,448	—0,406	—0,371	—0,328	—0,284	—0,259	—0,239	—0,206
Dy	2,51	—0,678	—0,569	—0,451	—0,416	—0,378	—0,337	—0,298	—0,273	—0,247	—0,217
Ho	2,94	—0,376	—0,393	—0,196	—0,192	—0,173	—0,173	—0,149	—0,138	—0,123	—0,106
Er	3,01	—0,175	—0,152	—0,126	—0,139	—0,119	—0,078	—0,075	—0,072	—0,064	—0,055
Tm	2,79	0,024	0,016	0,015	0,011	0,010	0,008	0,006	0,005	0,005	0,009
Yb	3,01	0,109	0,090	0,070	0,063	0,057	0,051	0,045	0,040	0,036	0,030

*1 Состав для La и Pr: $R_2O_3 \cdot x\,B_2O_3$; для Tb — Pr и Dy — Pr: $R'_2O_3 \cdot R''_2O_3 \cdot x\,B_2O_3$; для других $R_2O_3 \cdot 0{,}85\,La_2O_3 \cdot x\,B_2O_3$.

*2 Состав $R_2O_3 \cdot x\,P_2O_5$.

Таблица 33.8. **Значения постоянной Верде V для жидкостей [2]**

Жидкость	λ, нм	t, °С	V, 10^2 мин/(Тл·см)
H_2O	546	20	1,54
	578	20	1,37
	589	20	1,307
HCl	589	20	2,24
CCl_4	578	20	1,68
NH_3	578	—40	1,73
PCl_3	578	26	3,05
$Ni(CO)_4$	578	17	7,35
Br_2	700	0	5,3
BrH	589	20	3,43
$SiCl_4$	589	16	1,89
HI	589	20	5,13

Таблица 33.9. **Значения постоянной Верде для органических соединений [2]**

Вещество	λ, нм	t, °С	V, 10^2 мин/(Тл·см)
C_4H_{10}	578	—10	1,179
C_5H_{12}	589	20	1,1490
C_6H_{12}	589	25	1,240
C_6H_6	578	20	3,10
C_7H_{14}	589	20	1,2946
C_9H_{12}	589	15	2,47
$C_{10}H_{18}$	589	20	1,3785
$C_{12}H_{10}$	589	15	3,82
$C_{13}H_{12}$	589	15	3,22
CH_3I	578	18	3,53
$CHCl_3$	578	18	1,67
CCl_4	578	20	1,68
C_6H_5Cl	589	25	2,891
C_6H_5Br	589	25	3,25
CH_4O	589	26	0,9515
C_3H_6O	589	15,2	1,13
C_4H_5N	589	15,2	2,44
C_6H_7N	589	15	4,14

33.4. КВАДРАТИЧНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ КЕРРА)

В кристаллах, обладающих центром симметрии, а также в изотропных веществах существует квадратичный электрооптический эффект, при котором изменение показателя преломления вещества пропорционально квадрату напряженности электрического поля.

Внешнее электрическое поле E ориентирует молекулы, обладающие электрическим моментом (дипольным, квадрупольным и т. п.), в результате возникает анизотропия и показатели преломления $n_{\parallel}$ (вдоль поля) и $n_{\perp}$ (перпендикулярно полю) становятся различными: $n_{\parallel} - n_{\perp} = KnE^2$, разность хода необыкновенного и обыкновенного лучей равна $\Delta = KnlE^2$, здесь K — постоянная Керра, м²/В², n — показатель преломления в отсутствие поля, l — длина оптического пути, м; E — напряженность электрического поля, В/м.

Эффект Керра, вызванный электрическим полем световой волны, называют высокочастотным. Значение постоянной Керра зависит от природы вещества, частоты света и температуры (табл. 33.10, 33.11).

Таблица 33.10. **Значения постоянной Керра для газов при давлении $p = 101{,}3$ гПа и длине волны $\lambda = 546$ нм [2]**

Газ	t, °С	K, 10^{-24} м²/В²	Газ	t, °С	K, 10^{-24} м²/В²
H_2	34,6	0,50	C_3H_8	0	0,94
O_2	0	0,50	C_2H_4	0	1,18
N_2	0	0,33	$(CH_3)_2O$	18	—5, 6
	22	0,16	$(C_2H_5)O$	62,7	—4,3
Cl_2	24	2,6	CH_3Cl	18	40,5
CO_2	17,5	1,7	C_2H_5Cl	18	61,3
N_2O	56,7	24,0	$CHCl_3$	89,5	—8,5
	26	3,4	CH_2ClCH_2Cl	108,5	5,2
HCl	18	6,4	$(CH_3)_2CO$	83,1	5,6
H_2S	18	1,8	C_2H_6	113,6	6,17
NH_3	17,5	3,6	$C_6H_5CH_3$	137,7	10,8
HCN	20	103	C_6H_5Cl	153,7	41,3
SO_2	18	—10,4	$C_6H_5NO_2$	235,5	162
CH_4	0	0,27			
C_2H_6	0	0,74			

Таблица 33.11. **Значения постоянной Керра для жидкости при длине волны $\lambda = 546$ нм [2]**

Жидкость	T, К	K, 10^{-24} м²/В²	Жидкость	T, К	K, 10^{-24} м²/В²
O_2	90	1,2	орто-$C_6H_4(CH_3)_2$	293	6,08
N_2	71,4	4,46	$(C_2H_5)_2O$	293	—2,95
CS_3	293	13,4	$CHCl_3$	293	12,9
C_6H_{12}	293	0,252	C_6H_5Cl	293	45,1
C_6H_6	293	1,62	$C_6H_5NO_2$	293	1570

33.5. ЭФФЕКТ ФОТОУПРУГОСТИ

Упругооптический эффект, или эффект фотоупругости, состоит в изменении показателя преломления вещества в результате влияния внешних статических или переменных механических напряжений.

Связь между изменением индикатрисы показателя преломления $\Delta(1/n^2)_{ij}$ и тензором деформаций S_{kl} определяется упругооптическим тензором p_{ijkl} четвертого ранга. Так как $(1n^2)_{ij}$ и S_{kl} симметричны и безразмерны, то элементы тензора p_{ijkl} также безразмерны и в силу симметрии по парам индексов (ij) и (kl) можно использовать укороченную запись:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^{6} p_{ij} S_j; \quad i, j = 1, 2, \ldots, 6,$$

применяя для пар индексов (ij) и (kl) стандартные обозначения: 1 вместо (11), 2 вместо (22), 3 вместо (33) и 4, 5. 6 соответственно вместо (23) и (32), (13) и (31), (12) и (21).

Фотоупругие свойства различных веществ для материалов различных точечных групп симметрии (рис. 33.1) приведены в табл. 33.12.

Дифракция света на акустических волнах может быть использована для отклонения пучков оптических лучей (табл. 33.13).

В табл. 33.12 и 33.13 кроме значений p_{ij} приведены также часто используемые для вычисления свойств материалов коэффициенты акустооптического «качества» M_1, $с^3/г$, M_2, $с^3/г$, и M_3, $см \cdot с^2/г$:

$$M_1 = \frac{n^7 p^2}{\rho v^3}; \quad M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho v^3}; \quad M_3 = \frac{n^7 p^2}{\rho v^2},$$

где n — показатель преломления; p — компонента тензора фотоупругости; ρ — плотность вещества и v — скорость звука в нем.

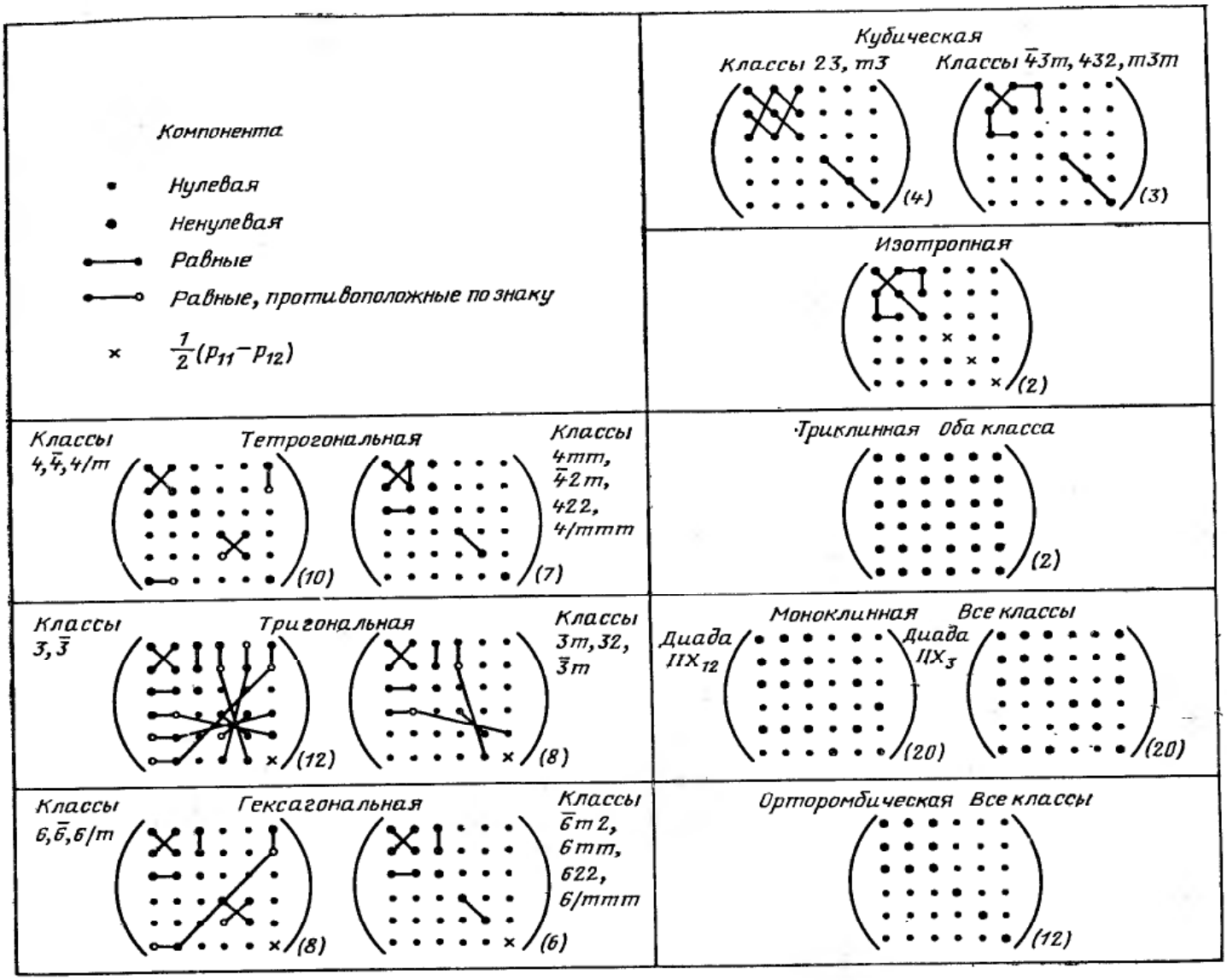


Рис. 33.1. Форма упругооптических тензоров (по сингониям) [2]

Таблица 33.12. **Фотоупругие свойства веществ по сингониям [2]**

Все измерения выполнены кри $T = 300$ К. Средняя погрешность для $P_{ij} \pm 5\%$. Если знак не указан, известен только модуль P_{ij}. Коэффициент качества M_2 нормироваи по плавленому кварцу. Для плавленого кварца $M_2 = 1{,}51 \cdot 10^{-18}$ с³/г

Сингония (класс)	Вещество	λ, мкм	p_{11}	p_{12}	M_2
Изотропиая	Кварц плавленый	0,63	+0,121	0,270	1,0
	As_2S_3-стекло	1,15	+0,308	0,299	230
	Вода	0,63	0,31	0,31	106
	33% Ge, 55% Se, 12% As	1,06	0,21	0,21	164
	Sb_2O_3	0,63	—	—	18
	Стекла разные	0,59	0.09—0,24	0,18—0,28	—
	Тяжелый флинт	0,63	0,27	0,24	12,5
	$PbO \cdot 2Sb_2O_3$	0,63	—	—	18,5
	Люцит	0,63	0,30	0,28	33
	Полистирол	0,63	0,30	0,31	84

Продолжение табл. 33.12

Сингония (класс)	Вещество	λ, мкм	p_{11}	p_{12}	p_{44}	M_2
Кубическая ($\bar{4}3m$, *432* и *m3m*)	GaP	0,63	—0,151	—0,082	—0,074	29,5
	GaAs	1,15	—0,165	—0,140	—0,072	69
	$Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)	0,63	—0,029	+0,009	—0,061	0,048
	$Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)	1,15	0,025	0,073	0,041	0,22
	β-ZnS	0,63	+0,091	—0,01	+0,075	2,3
	Ge	10,6	+0,27	+0,235	+0,125	540,0
	$ZnAl_2O_4$	0,63	<0,009	0,03	—	0,005
	$SrTiO_3$	0,63	0,13	0,095	0,072	1,1
	$Y_3Ga_5O_{12}$	0,63	0,091	0,019	0,079	0,56
	Бромид таллия	0,63	—	—	—	118,3
	Алмаз	0,59	—0,31÷—0,43	—0,03÷+0,19	—0,16	—
	LiF	0,59	+0,02	+0,128	—0,064	—
	MgO	0,59	—0,32	—0,08	—	—
	$Bi_4Ge_3O_{12}$	0,63	—	—	—	33
	KBr	0,59	+0,22	+0,171	—0,026	—
	KCl	0,59	+0,17	+0,124	—	—
	KI	0,59	+0,210	+0,169	—	—
	NaCl	0,59	+0,110	+0,153	—0,010	—

Сингония (класс)	Вещество	λ, мкм	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{44}	M_2
Кубическая (*23* и *m3*)	$Ba(NO_3)_2$	0,63	0,15	0,35	0,29	0,02	15,0
	$Bi_{12}GeO_{20}$	0,63	—	—	—	—	6,6
	$Bi_{12}SiO_{20}$	0,63	—	—	—	—	6,0
	$Pb(NO_3)_2$	0,63	—	—	—	—	17,0
	$NaBrO_3$	0,59	0,185	0,218	0,213	—0,0139	—
	$NaClO_3$	0,59	0,162	0,24	0,20	—0,198	—

Продолжение табл. 33.12

Сингония (класс)	Вещество	λ, мкм	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}	p_{31}	p_{33}	p_{41}	p_{44}	M_2
Тригональная (*3m*, *32* и $\bar{3}m$)	$LiTaO_3$	0,63	0,08	0,08	0,09	0,03	0,09	0,15	0,02	0,02	0,91
	$\alpha = Al_2O_3$	0,63	0,20	0,078	~0	—	0	0,252	—	0,09	0,22
	Te	10,6	0,155	0,130	—	—	—	—	—	—	2,92
	$LiNbO_3$ (P^E)	0,63	−0,02	+0,08	+0,13	−0,08	+0,17	+0,07	−0,15	+0,12	9,0
	Рубин (Al_2O_3 + 0,05% Cr)	0,63	−0,23	−0,03	+0,02	0,00	−0,04	−0,20	+0,01	−0,10	—
	α-Кварц (SiO_2)	0,59	+0,128	+0,25	+0,259	−0,029	+0,258	+0,098	−0,042	−0,0685	—
	$CaCO_3$	—	+0,095	+0,189	+0,215	−0,006	+0,309	+0,178	+0,01	−0,090	—
(*3* и $\bar{3}$)	Li_2WO_4	0,63	—	—	—	—	—	—	—	—	2,5
Гексагональная ($\bar{6}m2$, *6m m*, *622* и *6/mmm*)(*6*, $\bar{6}$ и *6/m*)	CdS	0,63	0,142	0,066	—	—	0,041	—	—	0,054	8,0
	$LiIO_3$	0,63	0,32	—	—	0,03	0,41	—	—	—	8,3
Тетрагональная (*4mm*, $\bar{4}2m$, *422* и *4/mmm*)	TiO_2 (рутил)	0,63	−0,011	+0,172	−0,168	—	−0,096	−0,058	—	—	2,6
	ADP	0,63	+0,302	+0,246	+0,236	—	+0,195	+0,263	—	0,075	4,2
	KDP	0,63	+0,251	+0,249	+0,246	—	+0,225	+0,221	—	0,058	2,5
	$ZrSiO_4$	0,63	0,06	—	0,13	—	0,07	0,09	—	0,10	2,4
	TeO_2	0,63	0,0074	+0,187	+0,340	—	+0,090	+0,240	−0,17	−0,046	525,0
	$Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$	0,63	0,16	0,10	0,08	—	0,11	0,47	—	—	26,0
	$Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$	0,63	0,06	0,08	0,17	—	0,09	0,23	—	—	5,8
(*4*, $\bar{4}$ и *4/m*)	$PbMoO_4$	0,63	0,24	0,24	0,255	—	0,15	0,29	—	—	23,7
	$CdMoO_4$	0,63	0,12	0,10	0,13	—	0,11	0,18	—	—	4,5
	$PbWO_4$		—								21,0

Продолжение табл. 33.12

Сингония (класс)	Вещество	λ, мкм	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{31}	p_{32}	p_{33}	p_{44}	p_{55}	p_{66}	M_2
Орторомбическая	α-HIO_3	0,63	0,406	0,277	0,304	0,279	0,343	0,305	0,503	0,310	0,334	—	—	0,092	55,0
	$Ca(NbO_3)_2$	0,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,3
	$PbCO_3$	0,63	0,15	0,12	0,16	0,05	0,06	0,21	0,14	0,16	0,12	—	—	—	15,0
	$Ba_2NaNb_5O_{15}$	—	—	—	—	—	—	—	0,17	—	—	—	—	—	5,0÷10,0
	$BaSO_4$	0,59	+0,21	+0,25	+0,16	+0,34	+0,24	+0,19	+0,27	+0,22	+0,31	+0,002	−0,012	+0,037	—
Моноклинная (все классы)	Pb_2MoO_5	0,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27,0

Таблица 33.13. **Акустооптические свойства веществ** [2]

Поляризация света определяется параллельно ($\parallel$) или перпендикулярно ($\perp$) плоскости, проходящей через направление распространения световой и акустической волн. Продольная (поперечная) поляризация акустической волны помечена знаком $*$ ($**$). Коэффициенты качества нормированы по плавленому кварцу. Коэффициент перевода: $1{,}51 \cdot 10^{-18}$ с^3/г. Ослабление звука нарастает с частотой как f^x, где $x \geqslant 1$. Данные пересчитаны к $f = 500$ МГц в предположении, что $x = 2$

Вещество	Область прозрачности, мкм	λ, мкм	n	Направление акустической волны	$v_{зв}$, 10^5 см/с	Поляризация, направление световой волны	M_1	M_2	M_3	Ослабление звука для $f = 500$ МГц, дБ/мкс
H_2C	0,2—0,9	0,633	1,33	—	1,5	$\parallel$ или $\perp$	6,1	106	24	75
D_2C	0,2—1,8									
GaP	0,6—10,0	0,633	3,31	$*$ [110] $**$ [100]	6,32 4,13	$\parallel$ $\parallel$ или $\perp$ [010]	75 17,4	29,5 16	69 25,7	$<1{,}0$ —
Ge	2—20	10,6	4,0	$*$ [111] $**$ [100]	5,50 3,51	$\parallel$ $\parallel$ или $\perp$	1270 182	540 190	1380 308	4,2 0,8
Кварц плавленый, SiO_2	0,2—4,5	0,633	1,46	$*$ $**$	5,96 3,76	$\perp$ $\parallel$ или $\perp$	1,0 0,12	1,0 0,31	1,0 0,2	1,8 —
α-HIO_3	0,3—1,8	0,633	1,98	$*$ [001]	2,44	$\perp$ [010]	13,6	55,0	32	0,6
$LiNbO_3$	0,5—4,5	0,633	2,20	$*$ [11$\bar{2}$0]	6,57	—	8,3	4,6	7,5	$<0{,}03$
$PbMoO_4$	0,4—5,5	0,633	2,39	$*$ [001]	3,66	$\parallel$ или $\perp$ [100]	15,3	23,7	24,9	1,2
As_2S_3-стекло	0,6—11	1,15	2,46	$*$	2,6	$\perp$	78,0	230	182	11,0
$Ge_{33}Se_{55}As_{32}$-стекло	1—14	1,06	2,7	$*$	2,52	$\parallel$ или $\perp$	53,0	164	128	1,8
Te	5—20	10,6	4,8	$*$ [11$\bar{2}$0]	2,2	$\parallel$ [0001]	1320	2920	3550	—
TeO_2	0,35—5,0	0,633	2.27	$*$ [001]	4,26	$\perp$ [010]	18,5	22,8	25,6	1,0
				$**$ [110]	0,617	$\parallel$ или $\perp$ [001]	8,8	525	85,0	3,0
TiC_2	0,45—5,5	0,633	2,58	$*$ [11$\bar{2}$0]	7,86	$\perp$ [0001]	7,9	2,6	6,2	—

33.6. ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Способность вещества вращать плоскость поляризации света при прохождении его через вещество называют *естественной оптической активностью*. Естественной оптической активностью обладает большое число кристаллов и их растворов.

Оптическую активность веществ характеризуют удельным вращением $[\alpha]_\lambda^t$, т. е. углом поворота α плоскости поляризации света, проходящего через слой вещества толщиной 10 см при температуре t, °С, длине волны λ и концентрации оптически активного вещества, равной 1 г/см³. Для чисто активной жидкости $[\alpha]=\alpha/(l\rho)$, для растворов $[\alpha]=100\alpha/(lP\rho)$, где α — угол поворота, град; l — толщина слоя, дм; ρ — плотность, г/см³; P — концентрация оптически активного вещества, г/100 г раствора.

Таблица 33.14. **Оптическая активность метиловых эфиров [2]**

Эфир	$[\alpha]_D^{20}$, град·см³/(г·дм)	$[M]_D^{20}$, град·см³/дм
$HCO_2C_{10}H_{19}$	—79,52	—146,3
$CH_3CO_2C_{10}H_{19}$	—79,42	—157,3
$C_2H_5CO_2C_{10}H_{19}$	—75,51	—160,2
$C_3H_7CO_2C_{10}H_{19}$	—69,52	—156,9
$C_4H_9CO_2C_{10}H_{19}$	—65,55	—157,3
$C_5H_{11}CO_2C_{10}H_{19}$	—62,07	—157,7
$C_6H_{13}CO_2C_{10}H_{19}$	—58,85	—155,7
$C_7H_{15}CO_2C_{10}H_{19}$	—55,25	—155,8
$C_8H_{17}CO_2C_{10}H_{19}$	—53,16	—157,3

Таблица 33.15. **Оптическая активность этилтартрата в различных растворителях [2]**

Растворитель	Дипольный момент растворителя μ, дебай	$[M]_{546,1\text{ нм}}^{20}$, град·см³/дм
s-$C_6H_3(CH_3)_3$	0	0
$C_6H_5OCH_3$	1,16	5
C_6H_6	0,4	7,4
$C_6H_5CH_3$	0	12,5
C_6H_5I	1,25	20,2
C_6H_5Br	1,56	21,8
C_6H_5Cl	1,56	23,0
C_6H_5CN	3,85	67,9
$C_6H_5NO_2$	3,90	80,6
C_6H_5COH	2,75	107,7
Чистый этилтартрат	—	16,25

Таблица 33.16. **Удельное вращение кристаллов [2]**

Кристалл	Формула	Класс	Длина волны, нм	$[\alpha]$, град/мм
Лития-калия сульфат	$KLiSO_4$	C_6	589	±3,43
Кварц	SiO_2	D_3	434	41,924
			486,1	32,761
			589,3	21,724
			656,3	17,320
Киноварь	HgS	D_3	687	325
Натрия хлорат	$NaClO_3$	T	556	±1,42
Сахар	$C_{12}H_{22}O_{11}$	C_2	589	1,6—5,4*1
Сегнетова соль	$KNaC_4H_4O_6\cdot 4H_2O$	D_2	589	—1,4

*1 Для различных направлений.

Молекулярная вращательная способность определяется выражением $[M]=[\alpha]\,M/100$ град·см³/дм, где M — молекулярная масса активного вещества, г.

В табл. 33.14—33.16 приведены характеристики оптической активности ряда веществ.

33.7. ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В КРИСТАЛЛАХ

Генерация второй гармоники в кристаллах описывается поляризацией среды

$$P_i^{(2\omega)} = \varepsilon_0 \sum_{j,k=1,2,3} d_{ijk}^{2\omega} E_j^{(\omega)} E_k^{(\omega)},$$

где коэффициенты $d_{ijk}^{2\omega}$ образуют тензор третьего ранга. Перестановка компонент поля E_j^ω и E_k^ω не влияет на значение P_i, поэтому члены тензора $d_{ijk}^{2\omega}$ удовлетворяют условиям симметрии $d_{ijk}^{2\omega}=d_{ikj}^{2\omega}$. В силу этого, как и для тензора пьезооптического эффекта (см. § 33.4), для $d_{ijk}^{2\omega}$ можно воспользоваться сокращенной записью $d_{il}^{2\omega}$, где l в зависимости от j и k пробегает значения от 1 до 6. В сокращенной записи компоненты поляризации среды записываются в матричной форме

$$(P_x,\ P_y,\ P_z) = \varepsilon_0 \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_x^2 \\ E_y^2 \\ E_z^2 \\ 2E_yE_z \\ 2E_xE_z \\ 2E_xE_y \end{bmatrix},$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Кл/(В·м) — электрическая постоянная; P — поляризация, Кл/м²; E — напряженность электрического поля, В/м; d_{il} — тензор квадратичной нелинейной восприимчивости, м/В.

Число ненулевых членов в тензоре $d_{il}^{2\omega}$ зависит от группы точечной симметрии среды. Для различных кристаллических классов вид тензора $d_{il}^{2\omega}$ приведен в табл. 33.17.

Мощность излучения второй гармоники P^{ω} определяется соотношением

$$P^{2\omega} = \frac{2\varepsilon_0^{1/2}\,\mu_0^{3/2}\omega^2\left(d_{il}^{2\omega}\right)^2\left(P^{\omega}\right)^2 L^2}{\pi r_0^2\, n^{2\omega}\left(n^{\omega}\right)^2}\, f(\Delta k),$$

где ω — частота, $с^{-1}$, и P^{ω} — мощность, Вт, исходного излучения; $\mu_0 = 1{,}257 \cdot 10^{-6}$ В·с/(А·м) — магнитная постоянная; n^{ω} и $n^{2\omega}$ — показатели преломления среды для излучения исходной частоты и его второй гармоники; L — длина пути луча в среде, м; r_0 — радиус луча, м; $f(\Delta k)$ — функция, описывающая рассогласование волновых векторов исходной световой волны и ее второй гармоники k_{ω} и $k_{2\omega}$. В тех случаях, когда выполняется условие синхронизма, т. е. $2k\omega = k_{2\omega}$ или $v(\omega) = v(2\omega)$, $\Delta k = 0$ и $f(\Delta k) = 1$. Это возможно только в средах, не обладающих дисперсией. В реальных же средах фазовые скорости $v(\omega)$ и $v(2\omega)$ различны, в силу чего $\Delta k > 0$ и $f(\Delta k) < 1$. Более того, при распространении световых волн в среде значение Δk постоянно меняется. Поэтому фазовые соотношения между исходной волной и ее гармоникой сохраняются только на некоторой длине, называемой *когерентной:*

$$l_{\text{ког}} = \frac{\pi}{2\left(k_{2\omega} - 2k_{\omega}\right)}.$$

В кристалле кварца, например, $l_{\text{ког}}$ всего порядка 10^{-3} см.

Существенное увеличение $l_{\text{ког}}$ достигается при точном выполнении условий синхронизма в анизотропных кристаллах. В них показатель преломления, а следовательно, и фазовая скорость зависят не только от частоты, но и от поляризации волны, поэтому возможно выполнение условий синхронизма на значительно большей длине. При этом в зависимости от выбора поляризации и ориентации кристалла возможны два типа фазового синхронизма. В отрицательных одноосных кристаллах, где показатель преломления для обыкновенной волны n_o (волны с поляризацией, перпендикулярной плоскости, проходящей через оптическую ось кристалла и направление луча) больше показателя преломления для необыкновенной волны n_e (волны с поляризацией, параллельной указанной плоскости), в некотором направлении θ_1, отсчитываемом от направления оптической оси кристалла,

$$n_e^{2\omega} = n_o^{\omega}$$

и в направлении θ_2

$$n_e^{2\omega} = \frac{1}{2}\left(n_o^{\omega} + n_e^{\omega}\right).$$

Соответственно для положительных одноосных кристаллов

$$n_o^{2\omega} = n_e^{\omega}; \quad n_o^{2\omega} = \frac{1}{2}\left(n_e^{\omega} + n_o^{\omega}\right).$$

Для двухосных кристаллов также возможно выполнение фазового синхронизма. Однако и для тех, и для других кристаллов само по себе наличие анизотропии показателя преломления недостаточно. Необходимо, чтобы соответствующие поверхности показателей преломления для исходной длины волны и ее гармоники по крайней мере касались друг друга, т. е. чтобы анизотропия была достаточно большой.

Когерентная длина $l_{\text{ког}}$ в реальных условиях эксперимента не обращается в бесконечность, как этого следовало бы ожидать при выполнении условия синхронизма. Расходимость реальных световых пучков приводит к тому, что часть лучей отклоняется от направления синхронизма, даже если ось пучка точно направлена по этому направлению.

Синхронизм называют *критическим,* если направление фазового синхронизма θ отличается от 90°, и *некритическим,* если $\theta = 90°$. В первом случае поверхности показателей преломления для исходной волны и ее гармоники пересекаются, что соответствует различию в направлениях для групповых скоростей (векторов Пойнтинга) обыкновенной и необыкновенной волн. Во втором направления групповых скоростей коллинеарны (поверхности показателей преломления касаются). Переход от критического синхронизма к некритическому можно осуществить выбором температуры кристалла.

Коэффициенты генерации второй гармоники (элементы тензора $d_{il}^{2\omega}$) нелинейных кристаллов приведены в табл. 33.18. Элементы тензора $d_{ijk}^{2\omega}$ связаны с линейными оптическими восприимчивостями сред через тензор третьего ранга $\delta_{ijk}^{2\omega}$ (тензор Миллера)*1.

$$d_{ijk}^{2\omega} = \varepsilon_0 \chi_{ii}^{2\omega}\, \chi_{jj}^{\omega}\, \chi_{kk}^{\omega}\, \delta_{ijk}^{2\omega},$$

где $\delta_{ijk}^{2\omega}$ — в м²/Кл; χ_{il} — безразмерные величины; $d_{ijk}^{2\omega}$ — в м/В. Значения $\delta_{il}^{2\omega}$ также приведены в табл. 33.18. Характерным является то, что вариации элементов тензора $\delta_{il}^{2\omega}$ от вещества к веществу значительно меньше, чем вариации для $d_{il}^{2\omega}$

Так как абсолютные или относительные знаки коэффициентов второй гармоники определены только для некоторых кристаллов, то они вынесены в отдельную табл. 33.19.

*1 Соотношение справедливо для кристаллов с симметрией, отличной от триклинной и моноклинной.

Таблица 33.17. **Форма тензора генерации второй гармоники для различных кристаллографических классов [2]**

Сингония	Класс	Форма тензора	Примечание
Триклинная	$1—C_1$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix}$	—
Моноклинная	$m—C_s$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & d_{35} & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Z$
	$m—C_s$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & d_{35} & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$
	$2—C_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & d_{25} & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	$2 \parallel Z$
	$2—C_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	$2 \parallel Y$
Ромбическая	$mm2—C_{2v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
	$222—D_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
Тетрагональная	$4—C_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{14} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
	$\bar{4} — S_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_{15} & d_{14} & 0 \\ d_{31} & -d_{31} & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
	$4mm—C_{4v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
	$\bar{4}2m—D_{2d}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
	$422—D_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—

Продолжение табл. 33.17

Сингония	Класс	Форма тензора	Примечание
Тригональная	$3—C_3$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & d_{15} & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & -d_{14} & -d_{11} \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
Тригональная	$3m—C_{3v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp X$
	$3m—C_{3v}$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & -d_{11} \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$
	$32—D_3$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
Гексагональная	$\bar{6}—C_{3h}$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & 0 & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & 0 & 0 & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
	$6—C_6$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{14} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $4—C_4$
	$\bar{6}m2—D_{3h}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp X$
	$\bar{6}m2—D_{3h}$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$
	$6mm—C_{6v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $4mm—C_{4v}$
	$622—D_6$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $422—D_4$
Кубическая	$23—T$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}$	—
	$\bar{4}3m—T_d$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}$	—
	$432—O$	Все члены тензора равны нулю	—

Таблица 33.18. Коэффициенты генерации второй гармонии по сингониям [2]

Сингония, вещество	Класс	$d_{il}^{2\omega}$, 10^{-12} м/В	$\delta_{il}^{2\omega}$, 10^{-2} м²/К	λ_1, мкм	n^{ω}	$n^{2\omega}$ (θ, град)
Моноклинная:						
лития сульфата моногидрат $Li_2SO_4 \cdot H_2O$	$2—C_2$	$d_{16} = (?)$	—	1,0642	1,4636	1,4624
		$d_{21} = (?)$	—	1,0642	1,4521	1,4868
		$d_{22} = 0,46 \pm 0,07$	—	1,0642	1,4657	1,4868
		$d_{23} = 0,33 \pm 0,05$	—	1,0642	1,4752	1,4868
		$d_{34} = 0,29 \pm 0,04$	—	1,152	1,4704	1,4769 (25)
калия битартрата гидрат $K_2C_4H_4O_6 \cdot {}^1/_2H_2O$	$2—C_2$	$d_{21} = 0,13$	0,68	0,6943	1,4893	1,5693
		$d_{22} = 4,26$	19,2	0,6942	1,5194	1,5693
		$d_{23} = 0$	0	0,6942	1,5294	1,5693
		$d_{25} = 0,19$	0,93	1,152	1,5043	1,5693 (20; 40)
триглицинсульфат (TGS) $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$	$2—C_2$	$d_{23} = 0,33$	1,09	0.6943	1,567	1,618
Ромбическая:						
аммония биоксалата моногидрат $(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$	$222—D_2$	$d_{14} = 0,43$	$\delta_{14} = 2,2$	1,06	1,4802	1,5996
		$\frac{1}{2}(d_{25} + d_{36}) = (0,78 \pm 0,07)$	—	1,06	—	—
гадолиния молибдат $Gd_2(MoO_4)_3$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = 2,98 \pm 0,45$	$\delta_{15} = 2,44 \pm 0,37$	1,0642	1,8386	1,8549
		$d_{24} = 2,93 \pm 0,44$	$\delta_{24} = 2,4 \pm 0,36$	1,0642	1,8384	1,8545
		$d_{31} = 2,83 \pm 0,42$	$\delta_{31} = 2,30 \pm 0,34$	1,0642	1,8146	1,9102
		$d_{32} = 2,75 \pm 0,41$	$\delta_{32} = 2,24 \pm 0,34$	1,0642	1,8142	1,9102
		$d_{33} = 0,05 \pm 0,009$	$\delta_{33} = 0,04 \pm 0,007$	1,0642	1,8637	1,9102
гиппуровая кислота $C_6H_5CO \cdot NH(CH_2CO_2H)$	$222—D_2$	$d_{36} = 2,85$	$\delta_{14} = 7,16$	0,6943	1,644	1,61
α-иодноватая кислота α-HIO_3	$222—D_2$	$d_{14} = 7,28 \pm 1,8$	$\delta_{14} = 4,43 \pm 1,09$	1,064	1,9391	1,8547 (24; 41,5)
калия дигидрофосфат (KDP) KH_2PO_4 при $T < -150$ °C	$mm2—C_{2v}$	$d_{14} = 4,83 \pm 0,9$	$\delta_{14} = 3,02 \pm 0,56$	1,1526	1,935	1,845
		$d_{15} = 0,57 \pm 0,05$	$\delta_{15} = 3,3 \pm 0,3$	0,6943	1,4906	1,540
		$d_{24} = 0,38 \pm 0,05$	$\delta_{24} = 2,2 \pm 0,3$	0,6943	1,4906	1,540
		$d_{31} = 0,58 \pm 0,05$	$\delta_{31} = 3,4 \pm 0,3$	0,6943	1,5117	1,4917
		$d_{32} = 0,39 \pm 0,05$	$\delta_{32} = 2,3 \pm 0,3$	0,6943	1,5117	1,4917
		$d_{33} = 0$	$\delta_{33} = 0$	—	1,4694	1,4917
литий метагадолиниевокислый $LiGdO_2$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = d_{31} = 0,08 \pm 0,009$	$0,1 \pm 0,01$	1,0642	1,7433	1,7705
		$d_{24} = d_{32} = 0,175 \pm \pm 0,019$	$0,25 \pm 0,027$	1,0642	1,7131	1,7705
		$d_{33} = 0,686 \pm 0,07$	$\delta_{33} = 0,88 \pm 0,09$	1,0642	1,7399	1,7705
лития формиата моногидрат $LiCHO_2 \cdot H_2O$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = d_{31} = (0,11 \pm 0,02)$	$\delta_{11} = 1,33 \pm 0,24$	1,0642	1,3593	1,5229 (81—95)
		$d_{24} = d_{32} = 1,27 \pm 0,09$	$\delta_{32} = 8,19 \pm 0,6$	1,0642	1,4673	1,5229 (55,1)
		$d_3 = 1,86 \pm 0,11$	$\delta_{33} = 10,03 \pm 0,6$	1,0642	1,5035	1,5229
натрия-бария ниобат $Ba_2NaNb_5O_{15}$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = 14,56 \pm 0,73$	$\delta_{15} = 2,35 \pm 0,11$	1,0642	2,2133	2,3655
		$d_{24} = 13,83 \pm 0,73$	$\delta_{24} = 2,23 \pm 0,11$	1,0642	2,2140	2,3672
		$d_{31} = 14,56 \pm 0,73$	$\delta_{31} = 2,42 \pm 0,12$	1,0642	2,2567	2,2502 (73—75)
		$d_{32} = 14,56 \pm 1,46$	$\delta_{32} = 2,41 \pm 0,16$	1,0642	2,2580	2,2502 (75—77)
		$d_{33} = 20 \pm 1,46$	$\delta_{33} = 4,06 \pm 0,30$	1,0642	2,1700	2,2502
натрия нитрит $NaNO_3$	$mm2—C_{2v}$	$d_{31} = d_{15} = 0,2$	0,88	1,153	1,629	1,4124
		$d_{32} = d_{24} = 0.87$	15,73	1,153	1,3391	1,4124
поливинилиденфторид $(CH_2CF_2)_n$	$mm2—C_{2v}$	$d_{31} = 0,18$	$\delta_{31} = 1,9$	1,064	—	$\simeq$1,43
		$d_{32} \simeq 0$	$\delta_{32} = 0$	1,064	—	—
		$d_{33} \simeq 0,36$	$\delta_{33} \simeq 3,8$	1,064	—	—
свинца ниобат $PbNb_4O_{11}$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = 6,7 \pm 1,0$	$\delta_{15} = 0,84 \pm 0,12$	1,0642	2,3115	2,4113
		$d_{24} = 6,17 \pm 0,93$	$\delta_{24} = 0,76 \pm 0,11$	1,0642	2,3131	2,4137
		$d_{31} = 7,4 \pm 1,1$	$\delta_{31} = 0,93 \pm 0,14$	1,0642	2,2979	2,4396
		$d_{32} = 6,68 \pm 1,00$	$\delta_{32} = 0,83 \pm 0,12$	1,0642	2,3010	2,4396
		$d_{33} = 10,1 \pm 1,5$	$\delta_{33} = 1,19 \pm 0,18$	1,0642	2,3254	2,4396
d-треонин	$222—D_2$	$d_{14} = 0,45 \pm 0,07$	$\delta_{14} = 1,72 \pm 0,27$	1,0642	1,5821	1,5243
		$d_{25} = 0,49 \pm 0,07$	$\delta_{25} = 1,86 \pm 0,27$	1,0642	1,5471	1,5965
		$d_{36} = 0,46 \pm 0,07$	$\delta_{36} = 1,74 \pm 0,27$	1,0642	1,5440	1,6043

Сингония, вещество	Класс	$d_{il}^{2\omega}$, 10^{-12} м/В	$\delta_{il}^{2\omega}$, 10^{-2} м²/К	λ_1, мкм	n^{ω}	$n^{2\omega}$ (θ, град)
тербия молибдат $Tb_2(MoO_4)_3$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = 2{,}87\pm0{,}43$	$\delta_{15} = 2{,}26\pm0{,}34$	1,0642	1,8459	1,8649
		$d_{24} = 2{,}9\pm0{,}4$	$\delta_{24} = 2{,}33\pm0{,}32$	1,0642	1,8458	1,8645
		$d_{31} = 2{,}6\pm0{,}4$	$\delta_{31} = 2{,}08\pm0{,}32$	1,0642	1,8226	1,9185
		$d_{32} = 2{,}52\pm0{,}38$	$\delta_{32} = 1{,}98\pm0{,}30$	1,0642	1,8222	1,9185
		$d_{33} = 0{,}12\pm0{,}03$	$\delta_{33} = 0{,}08\pm0{,}02$	1,0642	1,8704	1,9185
Тригональная:						
алюминия фосфат $AlPO_4$	$32—D_3$	$d_{11} = (0{,}41\pm0{,}03)$	$\delta_{11} = 2{,}07\pm0{,}15$	1,0582	1,5156	1,5275
		$d_{14} \simeq 0{,}009$	$\delta_{14} = 0{,}046$	1,0582	1,5198	1,5275
бензил $C_6H_5COCOC_6H_5$	$32—D_3$	$d_{11} = (4{,}08\pm0{,}55)$	$\delta_{11} = 9{,}36\pm1{,}26$	1,0642	1,6313	1,669
калия дитионат $K_2S_2O_4$	$32—D_3$	$d_{11} = 0{,}087\pm0{,}015$	$\delta_{11} = 0{,}69\pm0{,}12$	0,6943	1,4518	1,4728
α-кварц α-SiO_2	$32—D_3$	$d_{11} = (0{,}4\pm0{,}02)$	$\delta_{11} = 1{,}86\pm0{,}9$	1,0582	1,532	1,542
		$d_{14} = 0{,}009$	$\delta_{14} = 0{,}14$	1,0582	1,536	1,542
лития ниобат $LiNbO_3$	$3m—C_{3v}$	$d_{11} = 0{,}364\pm0{,}04$	$\delta_{11} = 1{,}6\pm0{,}2$	1,0642	1,5341	1,5468
		$d_{22} = (3{,}07\pm0{,}28)$	$\delta_{22} = 0{,}497\pm0{,}045$	1,0582	2,2322	2,3241
		$d_{31} = (5{,}82\pm0{,}85)$	$\delta_{31} = 1{,}04\pm0{,}15$	1,0582	2,2322	2,2325
		$d_{33} = (40{,}68\pm10{,}4)$	$\delta_{33} = 8{,}7\pm2{,}2$	1,0582	2,1544	2,2325
		$d_{31} = (5{,}01\pm0{,}47)$	$\delta_{31} = 0{,}92\pm0{,}09$	1,152	2,2278	2,2153
		$d_{22} = (2{,}41\pm0{,}95)$	$\delta_{22} = 0{,}4\pm0{,}16$	1,152	2,2278	2,3037
		$d_{15} = (6{,}28\pm0{,}63)$	$\delta_{15} = 1{,}18\pm0{,}12$	0,6328	2,1854	2,2854
		$d_{33} = (30{,}27\pm7{,}57)$	$\delta_{33} = 6{,}7\pm1{,}7$	1,152	2,1506	2,2153
лития танталат $LiTaO_3$	$3m—C_{3v}$	$d_{22} = (2{,}08\pm0{,}24)$	$\delta_{22} = 0{,}48\pm0{,}06$	1,0582	2,1366	2,2043
		$d_{31} = (1{,}28\pm0{,}24)$	$\delta_{31} = 0{,}29\pm0{,}06$	1,0582	2,1366	2,2089
		$d_{33} = (19{,}39\pm2{,}36)$	$\delta_{33} = 4{,}4\pm0{,}53$	1,0582	2,1406	2,2089
пираргирит Ag_3SbS_3	$3m—C_{3v}$	$d_{31} = (12{,}6\pm4)$	$\delta_{31} = 0{,}58\pm0{,}18$	10,6	2,7352	2,6221 (29±1)
		$d_{22} = (13{,}4\pm4)$	$\delta_{22} = 0{,}55\pm0{,}16$	10,6	2,7352	2,758
прустит Ag_3AsS_3	$3m—C_{3v}$	$d_{31} = (15{,}08\pm2{,}2)$	$\delta_{31} = 0{,}64\pm0{,}09$	1,152	2,8042	2,5731 (90)
		$d_{15} + d_{22} = (28{,}38\pm1{,}8)$	—	10,6	~2,697	~2,728 (22,5±5)
ртути сульфид α-HgS	$32—D_3$	$d_{11} = 50{,}3\pm17$	$\delta_{11} = 2{,}93\pm1$	10,6	2,596	2,624
селен Se	$32—D_3$	$d_{11} = 79{,}6\pm42$	$\delta_{11} = 4{,}2\pm2{,}2$	10,6	2,64	2,645 (10)
теллур Te	$32—D_3$	$d_{11} = (5319{,}8+$ $+837{,}7)$	$\delta_{11} = 1{,}07\pm0{,}17$	10,5915	6,243	6,305 (14,16)
турмалин	$3m—C_{3v}$	$d_{15} = 0{,}27\pm0{,}04$	$\delta_{15} = 0{,}70\pm0{,}1$	—	1,618	1,6433
		$d_{22} = 0{,}08\pm0{,}01$	$\delta_{22} = 0{,}22\pm0{,}03$	—	1,6274	1,6433
		$d_{31} = 0{,}16\pm0{,}03$	$\delta_{31} = 0{,}42\pm0{,}08$	—	1,6274	1,6231
		$d_{33} = 0{,}57\pm0{,}07$	$\delta_{33} = 1{,}58\pm0{,}19$	—	1,6088	1,6231
Тетрагональная:						
аммония дигидрофосфат (ADP) $NH_4H_2PO_4$	$42m—D_{2d}$	$d_{14} = 0{,}553\pm0{,}024$	$\delta_{14} = 3{,}19\pm0{,}14$	1,0582	1,4874	1,5277
		$d_{36} = 0{,}558\pm0{,}028$	$\delta_{36} = 3{,}27\pm0{,}16$	1.0582	1,5067	1,4816 (41,9±1)
		$d_{14} = 0{,}482\pm0{,}024$	$\delta_{14} = 2{,}52\pm0{,}12$	0,6943	1,4973	1,5498
		$d_{36} = 0{,}487\pm0{,}028$	$\delta_{36} = 2{,}57\pm0{,}15$	0,6943	1,5193	1,5004 (51,9±1)
		$d_{36} = 0{,}544\pm0{,}14$	$\delta_{36} = 3{,}25\pm0{,}84$	1,15	1,50364	1,4794
		$d_{36} = 0{,}57\pm0{,}068$	$\delta_{36} = 2{,}93\pm0{,}35$	0,6328	1,5217	1,5075
		$d_{36} = 0{,}66\pm0{,}14$	$\delta_{36} = 3{,}65\pm0{,}77$	0,8250	1,5145	1,4907 (42)
аммония дидейтерофосфат (ADDP) $ND_4D_2PO_4$	$\bar{4}2m—D_{2d}$	$d_{36} = 0{,}52\pm0{,}08$	$\delta_{36} = 2{,}88\pm0{,}44$	0,6943	1,5138	1,4926 (47)
бария титанат $BaTiO_3$	$4mm—C_{4v}$	$d_{15} = 17{,}2\pm1{,}42$	$\delta_{15} = 1{,}98\pm0{,}16$	1,058	—	—
		$d_{31} = 17{,}97\pm1{,}42$	$\delta_{31} = 2{,}11\pm0{,}17$	1,058	—	—
		$d_{33} = 6{,}6\pm0{,}5$	$\delta_{33} = 0{,}85\pm0{,}06$	1,058	—	—
		$d_{15} = 19{,}33\pm2{,}0$	$\delta_{15} = 2{,}23\pm0{,}23$	1,0642	2,3175	2,4760
		$d_{31} = 17{,}85\pm2{,}0$	$\delta_{31} = 2{,}10\pm0{,}23$	1,0642	2,3379	2,4128
		$d_{33} = 7{,}79\pm1{,}17$	$\delta_{33} = 1{,}0\pm0{,}15$	1,0642	2,2970	2,4128

Сингония, вещество	Класс	$d_{il}^{2\omega}$, 10^{-12} м/В	$\delta_{il}^{2\omega}$, 10^{-2} м²/К	λ_1, мкм	n^{ω}	$n^{2\omega}$ (0° град)
барий-стронция ниобат $Sr_{0,5}Ba_{9,5}Nb_2O_6$		$d_{31} = 4,9\pm1,5$ $d_{33} = 12,85\pm3,8$ $d_{15} = 6,8\pm2,3$	$0,78\pm0,24$ $2,20\pm0,65$ $\delta_{15} = 1,07\pm0,36$	1,0642 1,0642 1,0642	2,2506 2,2138 2,2322	2,3092 2,3092 2,3583
бериллия сульфата тетрагидрат $BeSO_4 \cdot 4H_2O$	$\bar{4}2m$—D_{2d}	$d_{36} = 0,16$	$\delta_{35} = (?)$	0,6328	—	(60±1)
кадмия-ртути тиоцианат $Cd[Hg(SCN)_4]$	$\bar{4}$—S_4	$d_{31} = 6,0\pm2,4$ $d_{31} = 7,57\pm1,4$ $d_{36} = 1,76\pm0,53$	$\delta_{31} = 4,21\pm1,69$ $\delta_{31} = 5,3\pm0,98$ $\delta_{36} = 1,23\pm0,37$	1,06 1,064 1,064	1,924 1,924 1,924	1,792 1,792 1,792
калия дидейтерофосфат (KDDP) KD_2PO_4	$\bar{4}2m$—D_{2d}	$d_{14} = 0,5\pm0,02$ $d_{36} = 0,5\pm0,02$ $d_{14} = 0,46\pm0,04$ $d_{36} = 0,5\pm0,02$	$\delta_{14} = 3,23\pm0,13$ $\delta_{36} = 3,24\pm0,13$ $\delta_{14} = 2,71\pm0,23$ $\delta_{36} = 3,04\pm0,12$	1,0582 1,0582 0,6943 0,6943	1,4789 1,4978 1,4830 1,5022	1,5085 1,4689 1,5285 1,4855 (52)
калия дигидроарсенат (KDA) KH_2AsO_4	$\bar{4}2m$—D_{2d}	$d_{14} = 0,55\pm0,02$ $d_{36} = 0,52\pm0,03$ $d_{14} = 0,41\pm0,05$ $d_{36} = 0,47\pm0,05$	$\delta_{14} = 2,35\pm0,08$ $\delta_{36} = 2,24\pm0,13$ $\delta_{14} = 1,58\pm0,19$ $\delta_{36} = 1,83\pm0,19$	1,0582 1,0582 0,6943 0,6943	1,531 1,554 1,538 1,562	1,572 1,521 1,606 1,549
калия дигидрофосфат (KDP) KH_2PO_4	$\bar{4}2m$—D_{2d}	$d_{14} = 0,49\pm0,02$ $d_{36} = 0,47$	$\delta_{14} = 3,10\pm0,13$ $\delta_{36} = 3,02\pm0,2$	1,0582 1,0582	1,4751 1,4939	1,5123 1,4706 (40,3)
		$d_{14} = 0,47\pm0,03$ $d_{36} = 0,47$	$\delta_{14} = 2,71\pm0,17$ $\delta_{36} = 2.73$	0,6943 0,6943	1,4856 1,5058	1,5335 1,4874 (50,4)
		$d_{36} = 0,46\pm0,07$ $d_{36} = 0,47\pm0,03$	$\delta_{36} = 3,01\pm0,46$ $\delta_{36} = 3,01\pm0,2$	1,15 1,0642	1,4913 1,4942	1,4687 1,4708
калия-лития ниобат $K_3Li_2Nb_5O_{15}$	$4mm$—C_{4v}	$d_{15} = 6,2\pm1,1$ $d_{31} = 7,0\pm1,5$ $d_{33} = 12,7\pm1,8$	$\delta_{15} = 1,19\pm0,2$ $\delta_{31} = 1,38\pm0,3$ $\delta_{33} = 3,14\pm0,44$	1,0642 1,0642 1,0642	2,1585 2,2057 2,1113	2,3297 2,1980 2,1980
калия-натрия-бария ниобат $K_{0,8}Na_{0,2}Ba_2Nb_5O_{15}$	$4mm$—C_{4v}	$d_{31} = 12,77$	$\delta_{31} = 2,22$	1,0642	2,2601	2,2007
рубидия дигидроарсенат (RDA) RbH_2AsO_4	$\bar{4}2m$—D_{2d}	$d_{36} = 0,3\pm0,04$	$\delta_{36} = 1,27\pm0,17$	0,6943	~1,555	~1,542
рубидия дигидрофосфат (RDP) RbH_2PO_4	$\bar{4}2m$—D_{2d}	$d_{36} = 0,49$ $d_{14} = 0,56\pm0,08$ $d_{36} = 0,43\pm0,05$	$\delta_{36} = 2,83$ $\delta_{14} = 3,47\pm0,49$ $\delta_{36} = 2,74\pm0,32$	0,6943 1,0642 1,0642	1,502 1,4813 1,4926	1,4969 (66) 1,5106 1,4811
свинца титанат $PbTiO_3$	$4mm$—C_{4v}	$d_{15} = 37,9\pm5,7$ $d_{31} = 42,8\pm6,4$ $d_{33} = 8,5\pm1,4$	$\delta_{15} = 2,09\pm0,3$ $\delta_{31} = 2,39\pm0,36$ $\delta_{33} = 0,48\pm0,08$	1,0642 1,0642 1,0642	2,5704 2,5712 2,5692	2,7398 2,7260 2,7260
серебра тиогаллат $AgGaS_2$	$\bar{4}2m$—D_{2d}	$d_{14} = 56,5\pm19$	$\delta_{14} = 7,17\pm2,4$	10,6	2,316	2,383
цезия дигидроарсенат CsH_2AsO_4	$\bar{4}2m$—D_{2d}	$d_{36} = 0,25\pm0,04$	$\delta_{36} = 0,93\pm0,15$	0,6943 1,06	1,563 —	1,572 — (90)
цинка-германия фосфид $ZnGeP_2$	$\bar{4}2m$—D_{2d}	$d_{14} = (111\pm33)$	$\delta_{14} = 1,96\pm0,58$	10,6	3,094	3,114
Гексагональная:						
бериллия окись BeO	$6mm$—C_{6v}	$d_{31} = 0,17\pm0,01$ $d_{33} = 0,23\pm0,01$	$\delta_{31} = 0,26\pm0,015$ $\delta_{33} = 0,34\pm0,015$	1,0642 1,0642	1,7055 1,7204	1,7376 1,7376
кадмия селенид CdSe	$6mm$—C_{6v}	$d_{33} = 79,6\pm4,9$ $d_{15} = 31\pm7,5$ $d_{31} = 28,5\pm6,3$ $d_{33} = 54,5\pm12,6$	$\delta_{33} = 3,54\pm0,22$ $\delta_{15} = 2,8\pm0,67$ $\delta_{31} = 2,56\pm0,57$ $\delta_{33} = 4,73\pm1,09$	1,058 10,6 10,6 10,6	2,560 2,453 2,445 2,462	3,036 2,447 2,465 2,465
кадмия сульфид CdS	$6mm$—C_{6v}	$d_{15} = 17,0\pm1,4$ $d_{31} = 15,6\pm0,9$ $d_{33} = 30,7\pm1,9$ $d_{15} = 28,9\pm7,1$ $d_{31} = 26,4\pm6,3$ $d_{33} = 44,0\pm12,6$	$\delta_{15} = 1,62\pm0,13$ $\delta_{31} = 1,5\pm0,09$ $\delta_{33} = 2,83\pm0,17$ $\delta_{15} = 4,88\pm1,2$ $\delta_{31} = 4,45\pm1,06$ $\delta_{33} = 7,1\pm2,0$	1,0582 1,0582 1,0582 10,6 10,6 10,6	2,336 2,327 2,345 2,252 2,242 2,263	2,649 2,654 2,654 2,244 2,265 2,265
кремния карбид SiC	$6mm$—C_{6v}	$d_{15} = 9,1\pm1,1$ $d_{31} = 9,83\pm1,1$ $d_{33} = 16,4\pm1,8$	$\delta_{15} = 0,50\pm0,06$ $\delta_{31} = 0,54\pm0,06$ $\delta_{33} = 0,84\pm0,09$	1,0642 1,0642 1,0642	2,6027 2,5830 2,6225	2,6689 2,7167 2,7167

Сингония, вещество	Класс	$d_{il}^{2\omega}$, 10^{-12} м/В	$\delta_{il}^{2\omega}$, 10^{-2} м²/К	λ_1, мкм	n^{ω}	$n^{2\omega}$ (θ, град)
лития иодат $LiIO_3$	$6—C_6$	$d_{31} = 5{,}2\pm0{,}7$	$\delta_{31} = 4{,}8\pm0{,}65$	1,0845	1,856	1,746 (28,9)
		$d_{31} = 5{,}6\pm0{,}3$	$\delta_{31} = 5{,}05\pm0{,}3$	1,0642	1,86	1,750 (30,2)
		$d_{33} = 5{,}86\pm0{,}36$	$\delta_{33} = 8{,}37\pm0{,}51$	1,0642	1,719	1,750
		$d_{31} = 7{,}5\pm1{,}1$	$\delta_{31} = 6{,}79\pm1{,}0$	0,5145	1,7876	1,9018
лития-калия сульфат $LiKSO_4$	$6—C_6$	$d_{31} = 0{,}38$	$\delta_{31} = (?)$	0,6943	—	—
		$d_{33} = 0{,}71$	$\delta_{33} = (?)$	0,6943	—	—
цинка окись ZnO	$6mm—C_{6v}$	$d_{15} = 2{,}32\pm0{,}2$	$\delta_{15} = 1{,}08\pm0{,}09$	1,0582	1,947	2,031
		$d_{31} = 2{,}1\pm0{,}2$	$\delta_{31} = 0{,}98\pm0{,}09$	1,0582	1,939	2,048
		$d_{33} = 7{,}0\pm0{,}2$	$\delta_{33} = 3{,}16\pm0{,}09$	1,0582	1,955	2,048
цинка сульфид ZnS	$6mm—C_{6v}$	$d_{33} = 13{,}5\pm0{,}8$	$\delta_{33} = 1{,}74\pm0{,}1$	1,058	2,299	2,403
		$d_{15} = 21{,}4\pm8{,}4$	$\delta_{15} = 3{,}42\pm1{,}34$	10,6	2,266	2,265
		$d_{31} = 18{,}85\pm6{,}3$	$\delta_{31} = 3{,}01\pm1{,}0$	10,6	2,264	2,270
		$d_{33} = 37{,}3\pm12{,}6$	$\delta_{33} = 5{,}89\pm1{,}99$	10,6	2,269	2,270
Кубическая:						
алюминия антимонид AlSb	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 49\pm36$	$\delta_{14} = 0{,}4\pm0{,}29$	1,058	3,3	3,87
висмута германат Bi_4GeO_{12}	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 1{,}46$	$\delta_{14} = 0{,}47$	1,0642	2,0443	2,1152
галлия антимонид GaSb	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 628\pm63$	$\delta_{14} = 2{,}84\pm0{,}28$	10,6	3,8	3,82
галлия арсенид GaAs	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 274\pm66$	$\delta_{14} = 1{,}4\pm0{,}34$	1,0582	3,479	4,352
		$d_{36} = 249\pm15$	$\delta_{36} = 1{,}27\pm0{,}08$	1,058	3,479	4,352
		$d_{14} = 188{,}5\pm19$	$\delta_{14} = 2{,}26\pm0{,}23$	10,6	3,27	3,30
		$d_{14} = 140\pm10$	$\delta_{14} = 0{,}72\pm0{,}05$	1,06	3,478	4,346
		$d_{14} = 137$	$\delta_{14} = 0{,}31$	0,8435—0,8450	3,60	5,90
галлия фосфид GaP	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 85{,}6\pm14{,}2$	$\delta_{14} = 1{,}14\pm0{,}19$	1,058	3,10	3,49
		$d_{36} = 41{,}2\pm2{,}5$	$\delta_{36} = 0{,}55\pm0{,}03$	1,058	3,10	3,49
		$d_{14} = 35{,}0$	$\delta_{14} = 0{,}73$	3,39	3,018	3,04
		$d_{14} = 109$	$\delta_{14} = 1{,}9$	10,6	3,00	3,01
индия антимонид InSb	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 520\pm47$	$\delta_{14} = 1{,}8$	1,058	—	—
индия арсенид InAs	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 364\pm47$	$\delta_{14} = (?)$	1,058	—	—
		$d_{14} = 418{,}9\pm12{,}6$	$\delta_{14} = 3{,}27\pm0{,}1$	10,6	3,49	3,54
индия фосфид InP	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 167{,}0$	$\delta_{14} = 0{,}94$	1,058	3,44	4,24
кадмия теллурид CdTe	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 16{,}7\pm6{,}3$	$\delta_{14} = 0{,}76\pm0{,}29$	10,6	2,69	2,71
меди бромид CuBr	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 7{,}96\pm2{,}7$	$\delta_{14} = 3{,}73\pm1{,}27$	10,6	1,970	1,972
		$d_{14} = 15{,}3\pm6{,}9$	$\delta_{14} = 5{,}07\pm2{,}28$	1,064	2,011	2,164
меди хлорид CuCl	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 4{,}19$	$\delta_{14} = 2{,}74$	10,6	1,893	1,895
		$d_{14} = 9{,}1\pm4{,}1$	$\delta_{14} = 4{,}64\pm2{,}09$	1,064	1,923	2,012
меди иодид CuI	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 7{,}96\pm2{,}6$	$\delta_{14} = 1{,}72\pm0{,}56$	10,6	2,176	2,178
		$d_{14} = 30{,}2\pm13{,}6$	$\delta_{14} = 4{,}65\pm2{,}09$	1,064	2,223	2,392
натрия бромат $NaBrO_3$	$23—T$	$d_{14} = 0{,}28$	$\delta_{14} = 0{,}71$	0,6943	1,611	1,661
натрия хлорат $NaClO_3$	$23—T$	$d_{14} = 0{,}69$	$\delta_{14} = 3{,}43$	0,6943	1,512	1,540
уротропин $N_4(CH_2)_6$	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{14} = 4{,}73$	$\delta_{14} = 15{,}7$	1,06	1,577	1,593
цинка селенид ZnSe	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{36} = 31{,}7\pm1{,}95$	$\delta_{36} = 2{,}21\pm0{,}14$	1,058	2,48	2,66
		$d_{14} = 78{,}3\pm29{,}3$	$\delta_{14} = 7{,}6\pm3$	10,6	2,42	2,43
цинка сульфид β-ZnS	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{36} = 24{,}6\pm1{,}5$	$\delta_{36} = 3{,}2\pm0{,}19$	1,058	2,289	2,40
		$d_{14} = 30{,}6\pm8{,}4$	$\delta_{14} = 5{,}08\pm1{,}39$	10,6	2,25	2,26
цинка теллурид ZnTe	$\bar{4}3m—T_d$	$d_{36} = 106{,}7\pm6{,}6$	$\delta_{36} = 2{,}96\pm0{,}18$	1,058	2,772	3,182
		$d_{14} = 94{,}6\pm9{,}5$	$\delta_{14} = 2{,}62\pm0{,}26$	1,058	2,772	3,182
		$d_{14} = 92{,}1\pm33{,}5$	$\delta_{14} = 4{,}19\pm1{,}5$	10,6	2,69	2,70

Таблица 33.19. **Знаки коэффициентов генерации второй гармоники [2]**

Вещество	d_{11}	d_{14}	d_{22}	d_{31}	d_{32}	d_{33}	Вещество	d_{11}	d_{14}	d_{22}	d_{31}	d_{32}	d_{33}
Бария-натрия ниобат				—	—	—	Лития формиата моногидрат					—	+
Бария титанат				—		—	Литня галлат				−	+	—
Бериллия окись				—		—	Лития иодат				—		—
Гадолиния молибдат				—	+	—	Лития ннобат			+	—		—
Галлия антимонид		+					Литня танталат			+	—		—
Галия арсенид		+					Меди хлорид		+				
Галлия фосфид		+					Натрия нитрит				±	±	
Индия арсенид		+					Свинца ниобат				±	±	±
Кадмия селенид				±		∓	Свинца титанат				±		±
Кадмия сульфид				—		+	Тербия молибдат				—	+	—
Кадмия теллурид		—					Цинка окись				+		—
Калия дигидрофосфат		+					Цинка селенид		+				
Кварц	+						Цинка сульфид		+		—		+
Кремния карбид				∓		±	Цинка теллурид		+				

ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛОВ

В табл. 33.20 представлены данные по показателям преломления нелинейных кристаллов. Для двуосных кристаллов принято, что главные показатели преломления соотносятся как

$$n_\gamma > n_\beta > n_\alpha .$$

Буквами *a, b, c* обозначены кристаллографические, а *X, Y, Z* — пьезоэлектрические оси кристаллов. В ряде случаев даны дисперсионные соотношения и изменения показателей преломления с температурой. В этих формулах λ, ν и T представляются соответственно в мкм, $см^{-1}$ и К.

Таблица 33.20. **Показатели преломления нелинейных кристаллов [2]**

Алюминия фосфат $AlPO_4$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4	1,5369	1,5465	1,4	1,5112	1,5198
0,5	1,5287	1,5385	1,6	1,5088	1,5174
0,6	1,5243	1,5334	1,8	1,5062	1,5145
0,7	1,5215	1,5301	2,0	1,5034	1,5116
0,8	1,5192	1,5281	2,2	1,5001	1,5083
1,0	1,5161	1,5245	2,4	1,4969	1,5048
1,2	1,5136	1,5223	2,6	1,4928	1,5006

Аммония дигидрофосфат ADP $NH_4H_2PO_4$

λ, мкм	n_o	n_e
0,2138560	1,62598	1,56738
0,2288018	1,60785	1,55138
0,2536519	1,58688	1,53289
0,2967278	1,56462	1,51339
0,3021499	1,56270	1,51163
0,3125663	1,55917	1,50853
0,3131545	1,55897	1,50832

Продолжение табл. 33.20

λ, мкм	n_o	n_e
0,3341478	1,55300	1,50313
0,3650146	1,54615	1,49720
0,3654833	1,54608	1,49712
0,3662878	1,54592	1,49698
0,3906410	1,54174	
0,4046561	1,53969	1,49159
0,4077811	1,53925	1,49123
0,4358350	1,53578	1,48831
0,4916036		1,48390
0,5460740	1,52662	1,48079
0,5769590	1,52478	1,47939
0,5790654	1,52466	1,47930
0,6328160	1,52166	1,47685
1,013975	1,50835	1,46895
1,128704	1,50446	1,46704
1,152276	1,50364	1,46666

$$n_o^2 = 2{,}302484 + 1{,}117089 \cdot 10^{-10}\,\nu^2/(1 - \nu^2/7{,}605372\times$$
$$\times 10^6) + 3{,}751806 \cdot 10^6/(2{,}5 \cdot 10^5 - \nu^2);$$
$$n_e^2 = 2{,}163077 + 9{,}670312 \cdot 10^{-11}\,\nu^2/(1 - \nu^2/7{,}785289\times$$
$$\times 10^6) + 1{,}451540 \cdot 10^6/(2{,}5 \cdot 10^5 - \nu^2);$$
$$\Delta n_o = \left(n_o^2 - 3{,}0297\, n_o + 2{,}3004\right) \cdot 0{,}713 \cdot 10^{-2}\,(298 - T)$$
$$\Delta n_e = n_e^2\,(0{,}675 \cdot 10^{-6}) \cdot (298 - T).$$

Аммония дидейтерофосфат ADDP $ND_4D_2PO_4$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,350	1,5414	1,4923	0,690	1,5142	1,4737
0,530	1,5198	1,4784	1,060	1,5088	1,4712

Аммония биоксалата моногидрат $(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$

λ, мкм	$n_\alpha = Z$	$n_\beta = Y$	$n_\gamma = X$
0,4471	1,4460	1,5599	1,6119
0,4713	1,4447	1,5561	1,6084
0,4922	1,4435	1,5544	1,6050
0,5016	1,4426	1,5536	1,6037
0,5461	1,4406	1,5493	1,5993
0,5780	1,4391	1,5470	1,5965
0,5876	1,4388	1,5469	1,5952
0,6678	1,4362	1,5426	1,5892
0,7016	1,4352	1.5408	1,5874
1,014	1,4295	1,5312	1,5763
1,129	1,4276	1,5284	1,5728
1,367	1,4235	1,5222	1,5652

Бария титанат $BaTiO_3$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4579	2,5637	2,4825	0,5321	2,4760	2,4128
0,4765	2,5355	2,4605	0,6328	2,4164	2,3637
0,4880	2,5206	2,4487	1,0642	2,3379	2,2970
0,5145	2,4917	2,4255	2,1284	2,2947	2,2593

$$n_o^2 - 1 = 4{,}239\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}2229)^2]$$

$$n_o^2 - 1 = 4{,}0854\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}2087)^2].$$

Бария-натрия ниобат $Ba_2NaNb_5O_{15}$

λ, мкм	$n_\alpha = c = Z$	$n_\beta = a = X$	$n_\gamma = b = Y$
0,4579	2,2931	2,4266	2,4284
0,4765	2,2799	2,4076	2,4094
0,4880	2,2727	2,3974	2,3991
0,4965	2,2678	2,3903	2,3920
0,5017	2,2649	2,3862	2,3879
0,5145	2,2583	2,3767	2,3786
0,5321	2,2502	2,3655	2,3672
0,6328	2,2177	2,3205	2,3222
1,0642	2,1700	2,2567	2,2580

$$n_\alpha^2 - 1 = 3{,}6008\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}17944)^2];$$

$$n_\beta^2 - 1 = 3{,}9495\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}20035)^2];$$

$$n_\gamma^2 - 1 = 3{,}9495\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}20097)^2].$$

Бария-калия-натрия ниобат $K_xNa_{1-x}Ba_2Nb_5O_{15}$

$$n_o^2 = 3{,}6680 + 24{,}681/[(4{,}3004)^2 - (1{,}2394/\lambda)^2];$$

$$n_e^2 = 2{,}9198 + 46{,}737/[(5{,}1605)^2 - (1{,}2394/\lambda)^2] \text{ при } 22^\circ C.$$

Бензил $(C_6H_5)_2 \cdot (CO)_2$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4205	1,737	1,737	0,5461	1,667	1,684
0,4358	1,716	1,720	0,5780	1,660	1,680
0,4380	1,712	1,718	0,5893	1,658	1,679
0,4620	1,694	1,705	0,6560	1,648	1,672
0,4860	1,682	1,695			

$$n_o^2 - 1 = 1{,}08 + 0{,}535\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}24)^2] + 0{,}0150\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}398)^2];\ n_e^2 - 1 = 1{,}35 + 0{,}370\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}24)^2] + 0.0138\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}395)^2].$$

Бериллия оксид BeO, 22,4°C

λ, мкм	n_o	n_e
0,430	1,73039	
0,440	1,72924	1,74556
0,450	1,72820	1,74447
0,460	1,72725	1 74348
0,470	1,72626	1 74251
0,480	1,72542	1 74162
0,490	1,72460	1,74073
0,500	1,72388	1,74002
0,510	1,72308	1,73918
0,520	1,72249	1,73852
0,530	1,72177	1,73779
0,540	1,72121	1,73703
0,550	1,72062	1,73644
0,560	1,72006	1,73588
0,570	1,71950	1,73530
0,580	1,71903	1,73477
0,590	1,71856	1,73423
0,600	1,71795	1,73381
0,610	1,71762	1,73322
0,620	1,71710	1,73279
0,630	1,71668	1,73233
0,640	1,71632	1,73191
0,650	1,71589	1,73156
0,660	1,71554	1,73113
0,670	1,71517	1,73075
0,680	1,71482	1,73041
0,690	1.71450	

$$n_o^2 - 1 = 1{,}919087\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}00727575) + 3{,}972323\,\lambda^2/(\lambda^2 - 199{,}31087);\ n_e^2 - 1 = 1{,}972142\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}00748564) + 17{,}5787\,\lambda^2/(\lambda^2 - 779{,}49122).$$

Висмута германат Bi_4GeO_{12}

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4765	2,142	0,5321	$2{,}115_2$
0,4880	$2{,}135_7$	0,6328	$2{,}086_1$
0,4965	$2{,}131_8$	1,0642	$2{,}044_3$
0,5017	$2{,}128_5$		
0,5145	$2{,}123_7$		

$$n^2 - 1 = 3{,}08959\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}01337).$$

Гадолиния молибдат $Gd_2(MoO_4)_3$

λ, мкм	$n_\alpha = b = Y$	$n_\beta = a = X$	$n_\gamma = c = Z$
0,4579	1,8758	1,8762	1,9342
0,4765	1,8694	1,8699	1,9270
0,4880	1,8659	1,8663	1,9229
0,4965	1,8634	1,8639	1,9201
0,5017	1,8621	1,8625	1,9185
0,5145	1,8588	1,8593	1,9148
0,5321	1,8545	1,8549	1,9102
0,6328	1,8385	1,8390	1,8915
1,064	1,8142	1,8146	1,8637

$n_\alpha^2 - 1 = 2{,}2450\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}022693)$; $n_\beta^2 - 1 = 2{,}24654\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}0226803)$; $n^2 - 1 = 2{,}41957\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}0245458)$.

Галлия арсенид GaAs

λ, мкм	n	λ, мкм	n
1,127	3,455	1,550	3,375
1,239	3,425	1,652	3,366
1,377	3,400		

Галлия фосфид GaP

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,5	3,4595	1,8	3,0439
0,6	3,3495	2,0	3,0379
0,7	3,2442	2,2	3,0331
0,8	3,1830	2,4	3,0296
0,9	3,1430	2,6	3,0271
1,0	3,1192	2,8	3,0236
1,1	3,0981	3,0	3,0215
1,2	3,0844	3,2	3,0197
1,4	3,0646	3,4	3,0181
1,6	3,0509	3,6	3,0166
		3,8	3,0159
		4,0	3,0137

Германия-цинка фосфид ZnGeP

λ, мкм	n_o	n_e
0,64	3,5052	3,5802
0,66	3,4756	3,5467
0,68	3,4477	3,5160
0,70	3,4233	3,4885
0,75	3,3730	3,4324
0,80	3,3357	3,3915
0,85	3,3063	3,3593
0,90	3,2830	3,3336
0,95	3,2638	3,3124
1,00	3,2478	3,2954
1,20	3,2054	3,2493

λ, мкм	n_o	n_e
1,40	3,1820	3,2244
2,00	3,1490	3,1889
2,40	3,1388	3,1780
3,00	3,1304	3,1693
3,40	3,1263	3,1647
4,00	3,1223	3,1608
4,50	3,1186	3,1561
5,00	3,1149	3,1533
6,00	3,1101	3,1480
7,00	3,1040	3,1420
8,00	3,0961	3,1350
9,00	3,0880	3,1272
10,00	3,0788	3,1183
11,00	3,0689	3,1087
12,00	3,0552	3,0949

Индия антимонид InSb

λ, мкм	n	λ, мкм	n
7,87	4,0	15,13	3,88
8,00	3,99	15,79	3,87
9,01	3,96	16,96	3,86
10,06	3,95	17,85	3,85
11,01	3,93	18,85	3,84
12,06	3,92	19,98	3,82
12,98	3,91	21,15	3,81
13,90	3,90	22,20	3,80

Кадмия селенид CdSe

λ, мкм	n_o	n_e
0,8	2,6448	2,6607
0,9	2,5826	2,6027
1,0	2,5502	2,5696
1,2	2,5132	2,5331
1,4	2,4929	2,5133
1,6	2,4818	2,5008
1,8	2,4732	2,4930
2,0	2,4682	2,4873
2,2	2,4642	2,4840
2,4	2,4612	2,4798
2,6	2,4590	2,4784
2,8	2,4562	2,4757
3,0	2,4542	2,4741
3,2	2,4532	2,4726
3,4	2,4518	2,4714
3,6	2,4509	2,4702
3,8	2,4498	2,4694
4,0	2,4491	2,4685

Продолжение табл. 33.20

Кадмия сульфид CdS

λ, мкм	n_o	n_e
0,5120	—	2,751
0,5130	—	2,743
0,5140	—	2,737
0,5150	2,743	2,726
0,5160	2,735	2,720
0,5170	2,727	2,714
0,5180	2,718	2,706
0,5190	2,709	2,702
0,5200	2,702	2,698
0,5210	2,700	2,694
0,5220	2,694	2,689
0,5230	2,687	2,685
0,5240	2,681	2,680
0,5250	2,674	2,675
0,5275	2,661	2,665
0,5300	2,649	2,654
0,5325	2,638	2,644
0,5350	2,628	2,637
0,5375	2,617	2,628
0,5400	2,609	2,622
0,5425	2,602	2,612
0,5450	2,594	2,606
0,5475	2,587	2,600
0,5500	2,580	2,593
0,5750	2,528	2,545
0,6000	2,493	2,511
0,6250	2,467	2,484
0,6500	2,446	2,463
0,6750	2,427	2,446
0,7000	2,414	2,432
0,7500	2,390	2,409
0,8000	2,374	2,392
0,8500	2,364	2,378
0,9000	2,359	2,368
0,9500	2,341	2,359
1,0000	2,334	2,352
1,0500	2,328	2,346
1,1000	2,324	2,340
1,1500	2,320	2,336
1,2000	2,316	2,332
1,2500	2,312	2,329
1,3000	2,309	2,326
1,3500	2,306	2,323
1,4000	2,304	2,321

Кадмия теллурид CdTe

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,903	2,91	7,0—10,0	2,69
1,0	2,84	10	2,69
1,1	2,81	14,0	2,69
1,0—1,3	2,82		

$$n^2 - 1 = 4{,}68 + 1{,}53\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}366)$$

Кадмия-ртути тиоцианат $Cd[Hg(SCN)_4]$, 27°C

λ, мкм	n_o	n_e
0,530	2,003	1,792
0,633	1,970	1,753
1,06	1,924	1,728

Продолжение табл. 33.20

Калия битартрат $K_2C_4H_4O_6 \cdot (1/2)\,H_2O$

λ, мкм	n_α	n_β	n_γ
0,3650	1,5156	1,5487	1,5630
0,4047	1,5090	1,5409	1,5541
0,4358	1,5049	1,5368	1,5494
0,5461	1,4961	1,5271	1,5384
0,5780	1,4945	1,5253	1,5363
1,014	1,4846	1,5142	1,5238
1,129	1,4832	1,5127	1,5218
1,367	1,4809	1,5102	1,5183

Калия дигидроарсенат KDA KH_2AsO_4

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4861	1,5762	1,5252	0,5893	1,5674	1,5179
0,5460	1,5707	1,5206	0,6563	1,5632	1,5146

Калия дигидрофосфат KDP KH_2PO_4

λ, мкм	n_o	n_e
0,2138560	1,60177	1,54615
0,2536519	1,56631	1,51586
0,2800869	1,55263	1,50416
0,2980628	1,54618	1,49824
0,3021499	1,54433	1,49708
0,3035781		1,49667
0,3125663	1,54117	1,49434
0,3131545	1,54098	1,49419
0,3341478		1,48954
0,3650146	1,52932	1,48432
0,3654833	1,52923	1,48423
0,3662878	1,52909	1,48409
0,3906410		1,48089
0,4046561	1,52341	1,47927
0,4077811	1,52301	1,47898
0,4358350	1,51900	1,47640
0,4916036		1,47254
0,5460740	1,51152	1,46982
0,5769580	1,50987	
0,5790654	1,50977	1,46856
0,6328160	1,50737	1,46685
1,013975	1,49535	1,46041
1,128704	1,49205	1,45917
1,152276	1,49135	1,45893
1,357070	1,48455	
1,523100	—	1,45521
1,529525	—	1,45512

$$n_o^2 = 2{,}259276 + 1{,}008956 \cdot 10^{-10}\,\nu^2/(1 - \nu^2/7{,}726408 \times \times 10^9) + \frac{3{,}251305 \cdot 10^6}{(2{,}5 \cdot 10^5 - \nu^2)};\quad n_e^2 = 2{,}132668 + 8{,}637494 \times \times 10^{-11}\,\nu^2/(1 - \nu^2/7{,}142631 \cdot 10^9) + 8{,}069981 \cdot 10^5/(2{,}5 \cdot 10^5 - -\nu^2);\quad \Delta n_o = 0{,}402 \cdot 10^{-4} \cdot \left(n_o^2 - 1{,}432\right)(298 - T);\quad \Delta n_e = = 0{,}221 \cdot 10^{-4} \times \left(n_e^2 - 1{,}105\right)(298 - T).$$

Калия дидейторофосфат KDDR KD_2PO_4

λ, мкм	n_o	n_e
0,4047	1,5189	1,4776
0,4078	1,5185	1,4772
0,4358	1,5155	1,4747
0,4916	1,5111	1,4710
0,5461	1,5079	1,4683
0,5779	1,5063	1,4670
0,6234	1,5044	1,4656
0,6907	1,5022	1,4639
1,000	1,4700	1,4400

$$\Delta n_o = 0{,}228 \cdot 10^{-4} \left(n_o^2 - 1{,}047 \right) (298 - T);$$

$$\Delta n_e = 0{,}955 \cdot 10^{-5}\, n_e^2\, (298 - T).$$

Калия дитионат $K_2S_2O_6$

λ, мкм	n_o	n_e
0,313	1,480	1,568
0,334	1,475	1,557
0,365	1,470	1,546
0,405	1,465	1,537
0,436	1,463	1,530
0,546	1,456	1,518
0,578	1,455	1,516
1,014	1,448	1,503
1,367	1,446	1,500
1,709	1,444	1,498
2,930	1,436	1,489
3,39	1,430	1,485

Калия-лития ниобат $K_2Li_2Nb_5O_{15}$

λ, мкм	n_o	n_e
0,4500	2,4049	2,2512
0,4750	2,3751	2,2315
0,5000	2,3546	2,2144
0,5250	2,3349	2,2010
0,5324	2,3260	2,1975
0,5500	2,3156	2,1900
0,5750	2,3016	2,1801
0,6000	2,2899	2,1720
0,6250	2,2799	2,1645
0,6500	2,2711	2,1586
0,6750	2,2631	2,1529

$$n_o^2 - 1 = 3{,}708\, \lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}04601),$$

$$n_e^2 - 1 = 3{,}349\, \lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}03564).$$

α-Кварц α-SiO_2

λ, мкм	n_o	n_e
0,185	1,65751	1,68988
0,198	1,65087	1,66394
0,231	1,61395	1,62555

λ, мкм	n_o	n_e
0,340	1,56747	1,57737
0,394	1,55846	1,56805
0,434	1,55396	1,56339
0,508	1,54822	1,55746
0,5893	1,54424	1,55335
0,7680	1,53903	1,54794
0,8325	1,53773	1,54661
0,9914	1,53514	1,54392
1,1592	1,53283	1,54152
1,3070	1,53090	1,53951
1,3958	1,52977	1,53832
1,4792	1,52865	1,53716
1,5414	1,52781	1,53630
1,6815	1,52583	1,53422
1,7614	1,52468	1,53301
1,9457	1,52184	1,53004
2,0531	1,52005	1,52823
2,3000	1,51561	
2,6000	1,50986	
3,0000	1,49953	
3,5000	1,48451	
4,0000	1,46671	
4,2000	1,4569	
5,000	1,417	
6,4500	1,274	
7,000	1,167	

Кислота гиппуровая $C_6H_5CO \cdot NH\,(CH_2CO_2H)$

λ, мкм	n_α	n_β	n_γ
0,350	1,55	1,61	1,78
0,589	1,5348	1,5921	1,7598
0,700	1,534	1,589	1,755

Кислота α-иодноватая α-HIO_3

λ, мкм	$n_\alpha = a = X$	$n_\beta = c = Z$	$n_\gamma = b = Y$
0,450	1,8798	2,0184	2,0560
0,500	1,8621	1,9930	2,0192
0,5325	1,8547	1,9829	2,0103
0,550	1,8497	1,9787	2,0049
0,600	1,8409	1,9665	1,9922
0,650	1,8352	1,9571	1,9812
0,700	1,8308	1,9505	1,9765
0,800	1,8250	1,9407	1,9672
0,850	1,8223	1,9378	1,9639
0,900	1,8206	1,9347	1,9595
0,950	1,8180	1,9318	1,9564
1,000	1,8147	1,9292	1,9537
1,065	1,8123	1,9275	1,9508
1,100	1,8116	1,9260	1,9484
1,200	1,8086	1,9230	1,9436

Кремния карбид SiC

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4880	2,6916	2,7423	0,5321	2,6689	2,7167
0,5017	2,6837	2,7337	0,6328	2,6351	2,6794
0,5145	2,6771	2,7261	1,0642	2,5830	2,6225

$$n_o^2 - 1 = 5{,}5515\ \lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}1625)^2];$$

$$n_e^2 - 1 = 5{,}7382\ \lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}16897)^2].$$

Лития галлат $LiGaO_3$

λ, мкм	n_{α}, $\beta=Y$, Z	$n_{\gamma}=X$	λ, мкм	n_{α}, $\beta=Y$, Z	$n_{\gamma}=X$
0,4100	1,7702	1,804	1,4000	1,7095	1,7372
0,4500	1,757	1,7895	1,6000	1,707	1,735
0,5000	1,7466	1,7785	1,8000	1,7045	1,7325
0,5500	1,7395	1,7702	2,0000	1,7025	1,7303
0,6000	1,7343	1,7615	2,2000	1,7005	1,7268
0,7000	1,7268	1,7565	2,4000	1,6978	1,7242
0,8000	1,7218	1,7507	2,6000	1,6955	1,7225
0,9000	1,7185	1,7475	2,8000	1,6925	1,720
1,0000	1,716	1,7445			
1,2000	1,7122	1,7405			

Лития иодат $LiIO_3$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4579	1,9186	1,7633	0,5145	1,9018	1,7506
0,4765	1,9124	1,7586	0,5321	1,8978	1,7475
0,4880	1,9089	1,7560	0,6328	1,8815	1,7351
0,4965	1,9065	1,7541	1,0642	1,8517	1,7168
0,5017	1,9051	1,7531			

$$n_o^2 - 1 = 2{,}40109\ \lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}021865);$$

$$n_e^2 - 1 = 1{,}91359\ \lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}01940).$$

Лития формиата моногидрат $LiCHO_2 \cdot H_2O$

λ, мкм	$n_{\alpha}=X=a$	$n_{\beta}=Y=b$	$n_{\gamma}=Z=c$
0,4579	1,3708	1,4901	1,5308
0,4765	1,3698	1,4883	1,5286
0,4880	1,3692	1,4873	1,5272
0,4965	1,3688	1,4866	1,5264
0,5017	1,3686	1,4862	1,5258
0,5145	1,3680	1,4851	1,5245
0,5321	1,3675	1,4838	1,5229
0,6328	1,3645	1,4784	1,5163
1,0642	1,3593	1,4673	1,5035

$$n_{\alpha}^2 - 1 = 0{,}8415\ \lambda^2\ /\ [\lambda^2 - (0{,}0953)^2];\ n_{\beta}^2 - 1 = 1{,}14106\ \lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}1183)^2];\ n_{\gamma}^2 - 1 = 1{,}2454 \times \lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}12496)^2].$$

Продолжение табл. 33.20

Лития ниобат $LiNbO_3$

λ, мкм	n_o	n_e
0,42	2,4144	2,3638
0,45	2,3814	2,2765
0,50	2,3444	2,2446
0,55	2,3188	2,2241
0,60	2,3002	2,2083
0,70	2,2862	2,1964
0,80	2,2756	2,1874
0,90	2,2598	2,1741
1,00	2,2487	2,1647
1,20	2,2407	2,1580
1,40	2,2291	2,1481
1,60	2,2208	2,1410
1,80	2,2139	2,1351
2,00	2,2074	2,1297
2,20	2,2015	2,1244
2,40	2,1948	2,1187
2,60	2,1882	2,1138
2,80	2,1814	2,1080
3,00	2,1741	2,1020
3,20	2,1663	2,0955
3,40	2,1580	2,0886
3,60	2,1493	2,0814
3,80	2,1398	2,0735
4,00	2,1299	2,0652
4,20	2,1193	2,0564

$$n_o^2 - 1 = 3{,}9130 + \frac{1{,}173 \cdot 10^5 + 1{,}65 \cdot 10^{-2}\ T^2}{\lambda^2 - (2{,}12 \cdot 10^2 + 2{,}7 \cdot 10^{-5}\ T^2)^2} - 2{,}78 \cdot 10^{-8}\ \lambda^2;\ n_e^2 - 1 = 3{,}5567 + 2{,}605 \cdot 10^{-7}\ T^2 + \frac{0{,}970 \cdot 10^5 + 2{,}70 \cdot 10^{-2}\ T^2}{\lambda^2 - (2{,}01 \cdot 10^2 + 5{,}4 \cdot 10^{-5}\ T^2)^2} - 2{,}24 \cdot 10^{-8}\ \lambda^2.$$

Лития сульфата моногидрат $LiSO_4 \cdot H_2O$

λ, мкм	n_{α}	n_{β}	n_{γ}
0,3650	1,4771	1,4926	1,5029
0,4047	1,4722	1,4876	1,4980
0,4358	1,4693	1,4849	1,4951
0,4471	1,4686	1,4834	1,4941
0,4713	1,4670		1,4926
0,5016	1,4652	1,4802	1,4905
0,5461	1,4631	1,4782	1,4882
0,5780	1,4619	1,4772	1,4867
0,5876	1,4616	1,4766	1,4866
0,6678	1,4593	1,4743	1,4838
0,7016	1,4585		1,4831
1,014	1,4538	1,4678	1,4777
1,129	1,4525	1,4666	1,4761
1,367	1,4502	1,4636	1,4732
1,530	1,4485		1,4708
1,709	1,4466	1,4588	1,4676

Лития танталат $LiTaO_3$

λ, мкм	n_o	n_e
0,45	2,2420	2,2468
0,50	2,2160	2,2205
0,60	2,1834	2,1878
0,70	2,1652	2,1696
0,80	2,1538	2,1578
0,90	2,1454	2,1493
1,00	2,1391	2,1432
1,20	2,1305	2,1341
1,40	2,1236	2,1273
1,60	2,1174	2,1213
1,80	2,1120	2,1170
2,00	2,1066	2,1115
2,20	2,1009	2,1053
2,40	2,0951	2,0993
2,60	2,0891	2,0936
2,80	2,0825	2,0871
3,00	2,0755	2,0799
3,20	2,0680	2,0727
3,40	2,0601	2,0649
3,60	2,0513	2,0561
3,80	2,0424	2,0473
4,00	2,0335	2,0377

Меди бромид CuBr

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4358	2,336±0,002	0,5791	2,122±0,002
0,4678	2,229±0,002	0,5896	2,117±0,002
0,4800	2,207±0,002	0,6438	2,096±0,002
0,5086	2,171±0,002	0,7699	2,069±0,004
0,5461	2,141±0,002		

Меди иодид CuI

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4358	2,562±0,002	0,5791	2,347±0,002
0,4678	2,461±0,002	0,5896	2,342±0,002
0,4800	2,448±0,002	0,6438	2,315±0,002
0,5086	2,411±0,002	0,7699	2,280±0,004
0,5461	2,372±0,002		

Меди хлорид CuCl

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4047	2,153±0,001	0,5086	2,004±0,001
0,4078	2,141±0,001	0,5461	1,987±0,001
0,4358	2,072±0,001	0,5791	1,976±0,001
0,4678	2,033±0,001	0,5896	1,972±0,001
0,4800	2,023±0,001	0,6438	1,958±0,001
		0,7699	1,941±0,002

Натрия бромат $NaBrO_3$

$$n^2 - 1 = 1{,}3194\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}09)^2] + 0{,}2357\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}2)^2] - 0{,}0174\,\lambda^2.$$

Натрия нитрит $NaNO_2$

λ, мкм	$n_{\alpha=a=X}$	$n_{\beta=b=Y}$	$n_{\gamma=c=Z}$
0,4358	1,3531	1,4212	1,690
0,4800	1,350	1,4166	1,675
0,5086	1,3484	1,4158	1,6685
0,5461	1,3470	1,4137	1,6620
0,5791	1,3458	1,4122	1,6567
0,5889	1,3455	1,4120	1,6555
0,6438	1,3442	1,4105	1,6510

Натрия хлорат $NaClO_3$

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,2310	1,616	0,4862	1,522
0,2573	1,585	0,5173	1,519
0,2748	1,572	0,5892	1,515
0,3256	1,549	0,6563	1,513
0,3404	1,544	0,6867	1,512
0,3467	1,542	0,7188	1,511
0,3611	1,539		

$$n^2 - 1 = 1{,}1825\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}09)^2] + 0{,}07992\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}185)^2] - 0{,}00864\,\lambda^2.$$

Пираргирит Ag_3SbS_3

$$n_o^2 - 1 = 6{,}585\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}4)^2] + 0{,}1133\,\lambda^2/[\lambda^2 - (15)^2];\quad n_e^2 - 1 = 5{,}845\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}4)^2] + 0{,}0202\,\lambda^2/[\lambda^2 - (15)^2].$$

Прустит Ag_3AsS_3, 20° C

λ, мкм	n_o	n_e
0,5876		2,7896
0,6328	3,0190	2,7391
0,6678	2,9804	2,7094
1,0140	2,8264	2,5901
1,1290	2,8067	2,5756
1,3670	2,7833	2,5570
1,530	2,7728	2,5485
1,709	2,7654	2,5423
2,50	2,7478	2,5282
3,56	2,7379	2,5213
4,62	2,7318	2,5178

$$n_o^2 = 7{,}483 + 0{,}474/(\lambda^2 - 0{,}09) - 0{,}0019\,\lambda^2;$$

$$n_e^2 = 6{,}346 + 0{,}342/(\lambda^2 - 0{,}09) - 0{,}0011\lambda^2.$$

Ртути сульфит α-HgS

λ, мкм	n_o	n_e
0,62	2,9028	3,2560
0,65	2,8655	3,2064
0,68	2,8384	3,1703
0,70	2,8224	3,1489
0,80	2,7704	3,0743
0,90	2,7383	3,0340
1,00	2,7120	3,0050
1,20	2,6884	2,9680
1,40	2,6730	2,9475
1,60	2,6633	2,9344
1,80	2,6567	2,9258
2,00	2,6518	2,9194
2,20	2,6483	2,9146
2,40	2,6455	2,9108
2,60	2,6433	2,9079
2,80	2,6414	2,9052
3,00	2,6401	2,9036
3,20	2,6387	2,9017
3,40	2,6375	2,9001
3,60	2,6358	2,8987
3,80	2,6353	2,8971
4,00	2,6348	2,8963
5,00	2,6267	2,8863
6,00	2,6233	2,8799
7,00	2,6156	2,8741
8,00	2,6112	2,8674
9,00	2,6066	2,8608
10,00	2,6018	2,8522
11,00	2.5914	2.8434

Рубидия дигидрофосфат RDP RbH_2PO_4

λ, мкм	n_o	n_e
0,4765	1,514	1,4861
0,4880	1,5132	1,4832
0,4965	1,5126	1,4827
0,5017	1,5121	1,4825
0,5145	1,5116	1,4820
0,5321	1,5106	1,4811
0,6328	1,4976	1,4775
1,0642	1,4926	1,4700

$n_o^2 - 1 = 1.2068\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0.01539)$;

$n_e^2 - 1 = 1,15123\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0,010048)$.

Свинца ниобат $PbNb_4O_{11}$

λ, мкм	$n_{\alpha=a=X}$	$n_{\beta=b=Y}$	$n_{\gamma=c=Z}$
0,4579	2,4754	2,4766	2,5047
0,4765	2,4554	2,4571	2,4845
0,4880	2,4445	2,4465	2,4735
0,4965	2,4371	2,4392	2,466
0,5017	2,4329	2,435	2,4618

λ,мкм	$n_\alpha = a = X$	$n_\beta = b = Y$	$n_\gamma = c = Z$
0,5145	2,4231	2,4254	2,4518
0,5321	2,4113	2,4137	2,4396
0,6328	2,3644	2,3667	2,3922
1,0642	2,2979	2,301	2,3254

$n_\alpha^2 - 1 = 4,124\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0,202)^2]$; $n_\beta^2 - 1 = 4,139\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0,2011)^2]$; $n_\gamma^2 - 1 = 4,246\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0,2014)^2]$.

Свинца титанат $PbTiO_3$

λ, мкм	n_o	n_e
0,4880	2,793	2,7744
0,5017	2,7742	2,7574
0,5145	2,7586	2,7431
0,5321	2,7398	2,7260
0,6328	2,6676	2,6594
1,0642	2,5712	2,5692
1,152	2,5637	2,5623

$n_o^2 - 1 = 5,359\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0,224)^2]$;

$n_e^2 - 1 = 5,365\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0,2170)^2]$.

Селен Se

λ, мкм	n_o	n_e
1,06	2,790±0,008	3,608±0,008
1,15	2,737±0,008	3,573±0,008
3,39	2,650±0,01	3,460±0,01
10,60	2,64 ±0,01	3,41 ±0,01

Серебра тиогаллат $AgGaS_2$. 20° С

λ, мкм	n_o	n_e
0,4916	2,700	2,710
0,5016	2,683	2,676
0,5461	2,619	2,585
0,5780	2,587	2,546
0,5876	2,579	2,537
0,6678	2,529	2,481

$n_o^2 = 5,728 + 0,2410/(\lambda^2 - 0,0870) - 0,00210\,\lambda^2$;

$n_e^2 = 5.497 + 0,2026/(\lambda^2 - 0,1307) - 0,00233\,\lambda^2$.

Теллур Te

λ, мкм	n_o	n_e
4,0	6,372	4,929
5,0	6,316	4,864
6,0	6,286	4,838
7,0	6,270	4,821
8,0	6,257	4,809
9,0	6,253	4,802
10,0	6,246	4,796
12,0	6,237	4,789
14,0	6,230	4,785

Тербия молибдат $Tb(MoO_4)_3$

λ, мкм	$n_{\alpha=b=Y}$	$n_{\beta=a=X}$	$n_{\gamma=c=Z}$
0,4579	1,8864	1,8867	1,9433
0,4765	1,8797	1,8800	1,9358
0,4880	1,8760	1,8764	1,9316
0,4965	1,8734	1,8739	1,9288
0,5017	1,8720	1,8724	1,9271
0,5145	1,8687	1,8690	1,9232
0,5321	1,8645	1,8649	1,9185
0,6328	1,8476	1,8482	1,8993
1,0642	1,8222	1,8226	1,8704

$$n_\alpha^2 - 1 = 2{,}27241\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}023359);$$

$$n_\beta^2 - 1 = 2{,}273955\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}02333);$$

$$n_\gamma^2 - 1 = 2{,}443016\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}025133).$$

d-Треонин

λ, мкм	$n_{\alpha=X}$	$n_{\beta=Y}$	$n_{\gamma=Z}$
0,4579	1,5299	1,6039	1,6125
0,4765	1,5282	1,6017	1,6100
0,4880	1,5272	1,6004	1,6087
0,4965	1,5266	1,5996	1,6077
0,5017	1,5263	1,5991	1,6072
0,5145	1,5254	1,5979	1,6059
0,5321	1,5243	1,5965	1,6043
0,6328	1,5196	1,5898	1,5974
1,0642	1,5114	1,5788	1,5855

$$n_\alpha^2 - 1 = 1{,}273\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}1032)^2];$$

$$n_\beta^2 - 1 = 1{,}477\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}1137)^2];$$

$$n_\gamma^2 - 1 = 1{,}497\,\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}1169)^2].$$

Турмалин

λ, мкм	n_o	n_e
0,4765	1,6474	1,6273
0,4880	1,6465	1,6263
0,4965	1,6457	1,6255
0,5017	1,6454	1,6251
0,5145	1,6446	1,6248
0,5320	1,6433	1,6231
0,6328	1,6378	1,6183
1,0642	1,6274	1,6088

$$n_o^2 - 1 = 1{,}6346\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}010734);$$

$$n_e^2 - 1 = 1{,}57256\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}011346).$$

Уротропин $(CH_2)_6N_4$

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4861	1,5984	0,5780	1,5899
0,5016	1,5953	0,5876	1,5893
0,5461	1,5917	0,6676	1,5856

Цинка окись ZnO

λ, мкм	n_o	n_e
0,45	2,1058	2,1231
0,50	2,0511	2,0681
0,60	1,9985	2,0147
0,70	1,9735	1,9897
0,80	1,9597	1,9752
0,90	1,9493	1,9654
1,00	1,9435	1,9589
1,20	1,9354	1,9500
1,40	1,9298	1,9429
1,60	1,9257	1,9402
1,80	1,9226	1,9370
2,00	1,9197	1,9330
2,20	1,9173	1,9313
2,40	1,9152	1,9297
2,60	1,9128	1,9265
2,80	1,9100	1,9251
3,00	1,9075	1,9214
3,20	1,9049	1,9186
3,40	1,9022	1,9160
3,60	1,8994	1,9127
3,80	1,8964	1,9101
4,00	1,8891	1,9068

Продолжение табл. 33.20

Цинка селенид ZnSe

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,589	2,61	1,5	2,45
1,0	2,48	2,0	2,44

$$n^2 - 1 = 2{,}855 + 2{,}045\,\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}109).$$

Цинка сульфид ZnS

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,3600	2,705	2,709	0,5000	2,421	2,425
0,3750	2,637	2,640	0,5250	2,402	2,407
0,4000	2,560	2,564	0,5500	2,386	2,392
0,4100	2,539	2,544	0,5750	2,375	2,378
0,4200	2,522	2,525	0,6000	2,363	2,368
0,4250	2,511	2,514	0,6250	2,354	2,358
0,4300	2,502	2,505	0,6500	2,346	2,350
0,4400	2,486	2,488	0,6750	2,339	2,343
0,4500	2,473	2,477	0,7000	2,332	2,337
0,4600	2,459	2,463	0,8000	2,324	2,328
0,4700	2,448	2,453	0,9000	2,310	2,315
0,4750	2,445	2,449	1,000	2,301	2,303
0,4800	2,438	2,443	1,200	2,290	2,294
0,4900	2,428	2,433	1,400	2,285	2,288

Цинка теллурид ZnTe, 25° С

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,569	3,111	0,760	2,871
0,577	3,085	0,770	2,866
0,579	3,079	0,800	2,853
0,589	3,054	1,000	2,790
0,600	3,035	1,200	2,758
0,616	3,005	1,300	2,748
0,650	2,962	1,400	2,741
0,700	2,913	1,500	2,734
0,725	2,893	1,515	2,734
0,750	2,879	2,060	2,71

33.8. ВЫНУЖДЕННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА

В сильном световом поле в нелинейной среде может происходить взаимодействие оптических волн не только друг с другом, но и с акустическими и молекулярными колебаниями вещества. Интенсивная световая волна частоты ω, возбуждая в среде когерентные акустические или молекулярные колебания с частотой Ω, одновременно дает рассеянную световую волну с частотой

$$\omega' = \omega \pm \Omega.$$

Если возбуждаемые колебания акустические, то рассеяние называют *вынужденным рассеянием Мандельштама — Бриллюэна* (ВРМБ) и

$$\Omega_{\text{М—Б}} = 2\omega\,(v_{\text{зв}}/c)\sin(\theta/2),$$

где $v_{\text{зв}}$ и c — соответственно скорости звука и света в среде; θ — угол, отсчитываемый от направления распространения световой волны (угол наблюдения). Наибольший сдвиг частоты происходит при рассеянии назад ($\theta = \pi$), при этом $\Omega_{\text{М—Б}} \simeq 10^{10}$ Гц (1 см$^{-1}$).

Если возбуждаются молекулярные колебания, то в зависимости от строения молекул вещества $\Omega \sim 100 \div 1000$ см$^{-1}$ и рассеяние называют *вынужденным комбинационным рассеянием* (ВКР).

В общем случае в ВКР может наблюдаться целый набор частот [*1]

$$\omega' = \omega \pm m\Omega' \pm n\Omega'' \pm \ldots,$$

где Ω', Ω'' — характерные молекулярные колебания данного вещества, а m и n — целые числа.

Характерный сдвиг частоты Ω при ВКР

	Ω, см$^{-1}$
Газы	
Кислород	1552
Калия пары	2721
Метан	2916
Дейтерий	2991
Водород	4155
Жидкости	
Бромоформ	222
Тетрахлорэтилен	447
Четыреххлористый углерод	460
Этил иодистый	497
Гексафторбензол	515
Бромоформ	539
Трихлорэтилен	640
Сероуглерод	656
Хлороформ	667
орто-Ксилол	730
α-Диметилфенетиламин	836
Диоксан	836
Морфолин	841
Тиофенол	916
Нитрометан	927
Бензол дейтерированный	944
Кумол	990
1, 3-Дибромбензол	990
Бензол	992
Пиридин	992
Анилин	997
Стирол	998
мета-Толуидин	999
Бромбензол	1000
Хлорбензол	1001
Бензонитрил	1002
трет-Бутилбензол	1002
Этилбензол	1002
Толуол	1004
Фторбензол	1012
γ-Пиколин	1016
мета-Крезол	1029
1-Фтор-*2*-хлорбензол	1030
мета-Дихлорбензол	1030
Иодбензол	1070
Бензоил хлористый	1086
Бензальдегид	1086

[*1] Для рассеяния Мандельштама — Бриллюэна аналогично $\omega' = \omega \pm k\Omega_{\text{М—}}$, где k — целое.

Продолжение

	Ω, см$^{-1}$
Анизол	1097
Пиррол	1178
Фуран	1180
Стирол	1315
Нитробензол	1344
1-Бромнафталин	1368
1-Хлорнафталин	1368
2-Этилнафталин	1381
мета-Нитротолуол	1389
Хинолин	1427
Бромциклогексан	1438
Фуран	1522
Метиловый эфир салициловой кислоты	1612
Коричный альдегид	1624
Стирол	1629
3-Метилбутадиен	1638
Пентадиен	1655
Изопрен	1792
Гексин-*1*	2116
орто-Дихлорбензол	2202
Бензонитрил	2229
Ацетонитрил	2250
1, *2*-Диметиланилин	2292
Метилциклогексан	2817
Метиловый спирт	2831
цис-, *транс*-*1*, *3*-Диметилциклогексан	2844
Тетрагидрофуран	2849
Циклогексан	2852
цис-*1*, 2-Диметилциклогексан	2854
α-Диметилфенетиламин	2856
Диоксан	2856
Циклогексан	2863
Циклогексанон	2863
цис-, *транс*-*1*, *3*-Диметилциклогексан	2870
цис-*1*, *4*-Диметилциклогексан	2873
Циклогексан	2884
Хлористый метилен	2902
Морфолин	2902
2-Октан	2908
2, *3*-Диметил-*1*, *5*-гексадиен	2910
Лимонен	2910
орто-Ксилол	2913
Гексин-*1*	2915
цис-*2*-Гептан	2920
Мезитилен	2920
2-Бромпропан	2920
Ацетон	2921
Этиловый спирт	2921
Карвон	2922
цис-*1*, 2-Диметилциклогексан	2927
Диметилформамид	2930
2-Хлор-*2*-Метилбутан	2931
2-Октан	2931
цис, *транс*-*1*, *3*-Диметилгексан	2931
мета-Ксилол	2933
1, *2*-Диэтиловый эфир винной кислоты	2933
орто-Ксилол	2933
Пиперидин	2933
1, *2*-Диэтилбензол	2934
2-Хлор-*2*-Метилбутен	2935
1-Бромпропан	2935
Пиперидин	2936
Тетрагидрофуран	2939
Пиперидин	2940
Циклогексанон	2945
2-Нитропропан	2948
1, *2*-Диэтилкарбонат	2955

Продолжение

	Ω, см$^{-1}$
1, *2*-Дихлорэтан	2956
транс-Дихлорэтилен	2956
1-Бромпропан	2962
2-Хлор-*2*-Метилбутан	2962
α-Диметилфенетиламин	2967
Диоксан	2967
Циклогексанол	2982
Циклопентан	2982
Циклопентанол	2982
Бромциклопентан	2982
орто-Дихлорбензол	2982
п-Хлортолуол	2982
α-Пиколин	2982
п-Ксилол	2988
орто-Ксилол	2992
Дибутилфталат	2992
1, *1*, *1*-Трихлорэтан	3018
Хлоргидрин этилена	3022
Изофорон	3022
Нитрозодиметиламин	3022
Пропиленгликоль	3022
Циклогексан	3038
Стирол	3056
Бензол	3064
трет-Бутилбензол	3064
1-Фтор-*2*-Хлорбензол	3084
Живица	3090
Псевдокумол	3093
Уксусная кислота	3162
Ацетонилацетон	3162
Метилметакрилат	3162
γ-Пиколин	3182
Анилин	3300
Вода	3651

Твердые вещества

Кварц	128
Ниобат лития	152
α-Сера	216
Ниобат лития	248
Кварц	466
α-Сера	470
Ниобит лития	628
Вольфрамат кальция	911
Стильбен	997
Полистирол	1001
Кальцит	1084
Алмаз	1332
Нафталин	1380
Стильбен	1591
Триглицинсульфат	2422
Триглицинсульфат	2702
Триглицинсульфат	3022
Полистирол	3054

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник** по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Советское радио, 1978.
2. **Таблицы** физических величин/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
3. **Барьяхтар В. Г., Иванов Б. А., Четкин М. В.**// Успехи физ. наук. 1985. Т. 146, вып. 3. С. 425.

Глава 34
ЛАЗЕРЫ

М. Е. Бродов, В. П. Яновский

34.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Лазеры, или *оптические квантовые генераторы (ОКГ)* — это устройства для генерации когерентного оптического излучения, основанные на использовании эффекта вынужденного излучения (термин «лазер» происходит от английского light amplification by stimulated emission of radiation, что означает усиление света с помощью вынужденного излучения).

При наличии инверсной населенности уровней энергии E_2 и E_1 активной среды ($E_2>E_1$), т. е. при выполнении условия $N_2/g_2>N_1g_1$ (N_2, N_1, g_2, g_1 — населенности и кратности вырождения уровней E_2, E_1) вынужденное излучение превалирует над поглощением и свет с резонансной частотой $\omega=E_2-E_1/\hbar$ усиливается при прохождении через среду. Усиленный таким образом свет люминесценции активной среды называют излучением сверхлюминесценции. Для возникновения генерации вводят положительную обратную связь, располагая активную среду в оптическом резонаторе, который в простейшем случае представляет собой два параллельных зеркала. Одно из зеркал резонатора делается полупрозрачным для частичного вывода излучения. Пространственное распределение поля генерируемого излучения соответствует собственным колебаниям резонатора, называемым модами. Различают продольные и поперечные моды, относящиеся к распределению поля вдоль оси резонатора и в плоскости, перпендикулярной оси. Искусственное снижение добротности резонатора позволяет достичь значительного коэффициента усиления активной среды без возникновения генерации. Последующее быстрое включение добротности приводит к генерации мощных световых импульсов малой длительности (гигантских импульсов).

Основными свойствами лазерного излучения, отличающими его от излучения других источников света, являются:

1) высокая когерентность (объем когерентности может превышать в 10^{17} раз объем когерентности световой волны той же интенсивности, получаемой от самых моноэнергетических нелазерных источников света);

2) возможность генерации импульсов предельно малой длительности (до $\tau\sim1{,}6\cdot10^{-14}$с);

3) высокая мощность излучения (до 10^{14} Вт) в импульсном режиме генерации.

Лазеры различаются:

1) по типу активной среды — *газовые* (атомные, ионные, молекулярные), *твердотельные* (на примесных кристаллах и стеклах, полупроводниковые, на центрах окраски), *жидкостные;*

2) по режиму генерации — *непрерывные, импульсные* (в режиме свободной генерации, с модуляцией добротности).

Сведения о принципах и режимах работы лазеров можно найти, к примеру, в [1, 2, 3].

34.2. ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В настоящее время инверсная населенность и генерация в газообразной среде получены более чем на 6000 переходов. Газовые лазеры работают в очень широком диапазоне длин волн — от вакуумного ультрафиолета до инфракрасной области спектра — как в импульсном, так и в непрерывном режиме.

Малая плотность и высокая однородность газообразной активной среды обусловливают высокую направленность и моноэнергетичиость лазерного излучения. Вместе с тем малая плотность газов не позволяет получить высокую плотность возбужденных частиц и такого удельного энергосъема, как в лазерах на основе конденсированных сред.

Методы создания инверсной населенности [4]. Специфика газов проявляется и в многообразии физических процессов, применяемых для создания инверсной населенности. К их числу относятся возбуждение при соударениях в электрическом разряде, химическое возбуждение, фотодиссоциация, газодинамические процессы, оптическая накачка, электронно-лучевое возбуждение.

В подавляющем большинстве газовых лазеров инверсия населенностей создается в электрическом разряде. При этом электроны разряда возбуждают газ, создавая инверсию населенностей уровней энергии ионов, нейтральных атомов, устойчивых и неустойчивых молекул. Газоразрядный метод применим для возбуждения лазеров как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Электрический разряд в газе бывает самостоятельным и несамостоятельным. Несамостоятельные разряды могут быть получены в газах высокого давления и больших объемах. Переход к несамостоятельным разрядам позволил резко поднять мощность и энергию излучения прежде всего таких лазеров с большим КПД, как CO_2-лазеры.

Хорошо разработан метод создания несамостоятельного разряда с использованием пучка электронов высокой энергии. Электронные пучки применяются также, наряду с импульсными лампами, для инициации химических реакций. При химическом возбуждении инверсия населенностей создается в результате химических реакций, при которых образуются возбужденные атомы, радикалы, молекулы. К химическим можно отнести и лазеры, инверсия населенностей в которых достигается с помощью фотодиссоциации. Как правило, это быстропротекающие реакции, инициируемые импульсной световой вспышкой.

Газодинамический метод получения инверсии основан на возможности получения потоков газов с быстро изменяющимися термодинамическими параметрами. Тепловая энергия нагретого газа при быстром охлаждении, например при протекании со сверхзвуковой скоростью через сопло, непосредственно преобразуется в таких системах в энергию электромагнитного моноэнергетического излучения.

При электронно-лучевом возбуждении газовых сред происходит ионизация газа электронами высокой энергии (0,3—3 МэВ). При этом энергия быстрых электронов первичного пучка каскадным образом преобразуется в энергию большого числа медленных электронов. Возбуждение верхних лазерных уровней осуществляется именно этими электронами низкой энергии.

Оптическая накачка для газовых активных сред эффективна, если источник накачки достаточно моноэнергетичен, поскольку резонансные линии поглощения газов узки. Обычно используются лазерные источники накачки.

Для газов характерна передача энергии возбуждения от частиц одного сорта частицам другого сорта при неупругих столкновениях между ними. Такая передача тем более эффективна, чем более точно совпадают уровни энергии сталкивающихся частиц.

В табл. 34.1 представлены вещества, на которых

получено стимулированное излучение. В табл. 34.2 приведены длины волн генерации. Порядок расположения веществ соответствует табл. 34.1. Сильные линии помечены жирным шрифтом. Длины волн в вакууме и воздухе обозначены $\lambda_{вак}$ и $\lambda_{возд}$.

Для обозначения линий ионизованных атомов используются римские цифры, которые ставятся перед длиной волны перехода. Таким образом, II, III, IV обозначают одно-, двух-, трехкратноионизованный атом.

В табл. 34.2 используется стандартная система обозначений молекулярной спектроскопии. Колебательно-вращательная полоса — совокупность переходов из верхнего колебательного состояния $(v_1, v_2, ..., v_n)_{верх}$ на нижнее $(v_1, v_2, ..., v_n)_{нижн}$, где $v_1, v_2, ..., v_n$ — квантовые числа для n нормальных колебаний молекулы. Квантовые числа v_1, v_2, v_3 для трехатомной молекулы относятся соответственно к симметричному валентному, деформационному и асимметричному валентному колебаниям. Чисто вращательные переходы — переходы между уровнями одного и того же электронного и колебательного состояния, различающиеся вращательным квантовым числом.

Более подробно информацию о газовых лазерах можно найти в [1, 2, 5, 6].

Таблица 34.1. **Активные среды газовых лазеров (последовательность расположения в гл. 34 справочника)**

Нейтральные и ионизованные атомы

He	Ag	In	O
Ne	Au	Tl	S
Ar	Be	C	Se
Kr	Mg	Si	Te
Xe	Ca	Ge	F
Fe	Sr	Sn	Cl
Ni	Ba	Pb	Br
H	Zn	N	I
Na	Cd	P	Mn
K	Hg	As	Sm
Rb	B	Sb	Eu
Cs	Al	Bi	Tm
Cu	Ga	U	Yb

Двухатомные молекулы

Xe_2	XeF	Bi_2	HCl
Ar_2	XeO	S_2	DCl
Kr_2	KrO	Te_2	HBr
ArF	HgBr	F_2	DBr
ArCl	HgCl	Br_2	NO
KrBr	H_2	Cl_2	CN
KrCl	D_2	I_2	OH
KrF	HD	ClF	DD
XeBr	Na_2	HF	CO
XeCl	N_2	DF	

Многоатомные молекулы

Xe_2Cl	OCS	ICN	H_2S
Xe_2Br	CH_2	NH_2	D_2S
Kr_2F	CS_2	NF_2	BF_2
O_3	HCN	FNO	BCl_3
CO_2	DCN	ClNO	SF_6
NO_2	HNC	BrNO	NH_3
C_2O	FCN	H_2O	PH_3
N_2O	ClCN	D_2O	NOCl
S_2O	BrCN	SO_2	

CF_4	CH_2Cl_2	CH_3ClH	C_2H_3Cl
CF_3Br	CH_3F	CH_3NH_2	C_2H_3Br
CF_3I	CH_3Cl	CH_2CF_2	C_2H_3CN
C_2H_2	CH_3Br	$C_2H_4[OH]_2$	CH_3OCH_3
C_2H_4	CH_3I	CH_3CH_2F	C_3H_2O
H_2CO	CH_3OH	CH_3CHF_2	ClO_2
$[H_2CO]_3$	CH_3CN	CH_3CF_3	HCCF
HCOOH	CH_3Ne	C_2H_5Cl	FCN
CH_2F_2		C_2H_5OH	

Таблица 34.2. **Лазерные переходы в нейтральных и ионизованных атомах, в двухатомных и многоатомных молекулах**

Активная среда He. *Условия возбуждения; импульсный и непрерывный разряд в* He *при* $P = 30 \div 100$ Па; *импульсный разряд в смеси* He (1,5—2 кПа) *и* H_2 (400 Па)

$\lambda_{возд}$, мкм		
0,706517	2,05813	8,53
0,706521	2,0603	95,763
1,8685	4,60535	216,12
1,9543	4,60567	

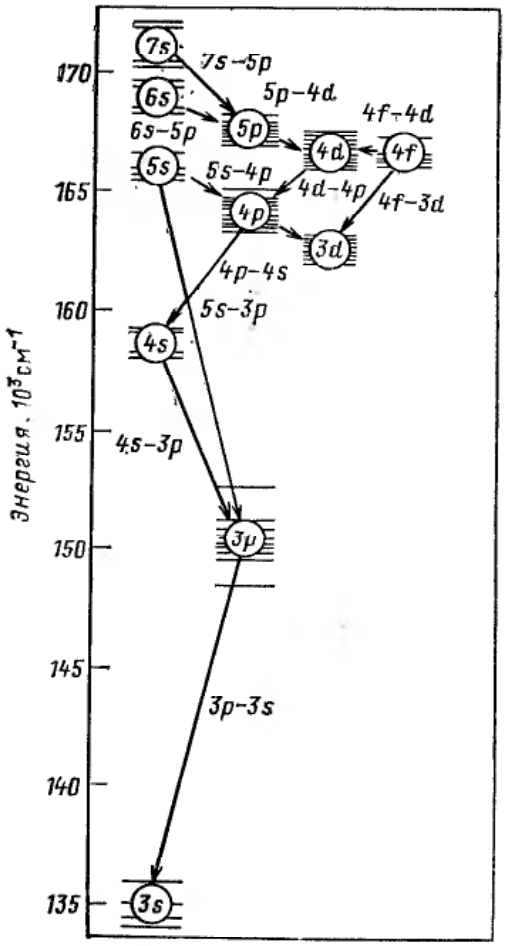


Рис. 34.1. Схема основных групп лазерных переходов в Ne [7]

Активная среда Ne [4] (*рис. 34.1*). *Условия возбуждения: ионные переходы возбуждаются в импульсном разряде при плотности тока около* 1 кА/см² *и* $P = 0{,}1 \div 1$ Па; *большинство атомных переходов возбуждается в смеси* Ne (1—10 Па) *и* He (70 Па); *многие переходы возбуждаются в чистом* Ne

	$\lambda_{возд}$, мкм		
IV	0,2018424	1,2460	3,5835
IV	0,2022186	1,2689	3,6515
IV	**0,2065304**	1,2887	3,7736
III	**0,2177705**	1,2912	3,9806
III	0,2180858	1,4276	4,2171
V	0,22657	1,4304	5,1696
IV	0,2285793	1,4321	5,3243
IV	**0,2357980**	1,4330	5,3249
IV	0,2373200	1,4346	5,4033
III	**0,2473398**	1,4368	5,405
III	0,2609982	1,484450	5,6652
III	0,26134	1,486926	5,7053
III	**0,2677918**	1,487247	5,7758
III	**0,2678690**	1,488759	5,8844
III	0,2777634	1,489954	5,9563
III	0,2866726	1,493623	6,7769
II	0,3319745	1,5231	6,8865
II	**0,3323745**	1,7162	6,9857
II	0,332717	1,8210	7,3208
II	0,332923	1,8253	7,4201
III	0,333114	1,8276	7,4217
II	0,3345446	1,8304	7,4679
II	**0,3378256**	1,8403	7,4779
II	**0,3392799**	1,8591	7,4973
II	**0,339320**	1,8597	7,5292
II	**0,348195**	1,9574	7,5674
II	**0,371309**	1,9577	7,5850
	0,54006	2,0350	7,6142
	0,58525	2,0353	7,6440
	0,59448	2,1041	7,6489
	0,59393	2,1708	7,6904
	0,60461	2,3260	7,6994
	0,61180	2,37	7,7389
	0,61431	**2,3951**	7,7634
	0,63282	2,4219	7,7794
	0,63518	2,4250	7,8347
	0,64011	2,5393	7,8693
	0,73048	2,5524	7,9406
	0,84634	2,7574	7,9824
	0,86353	2,7819	8,0066
	0,87717	2,9448	8,0599
	0,88653	2,9668	8,1712
	0,89886	2,9805	8,3347
	0,92874	3,0260	8,3472
	1,0295	3,0268	8,8388
	1,0621	3,3173	8,8528
	1,0798	3,391	9,0871
	1,0844	3,3333	10,060
	1,11441	3,3353	10,978
	1,1177	3,3500	11,857
	1,1390	3,3510	11,898
	1,1409	3,3804	12,831
	1,15235	3,3840	13,736
	1,15259014	3,3903	13,756
	1,1601	**3,3913**	16,634
	1,1614	3,4471	16,664
	1,17673	3,4489	16,889
	1,1789	3,475	16,943
	1,1985	4,4789	17,153
	1,2066		

17,184	32,507	55,51
17,800	33,815	57,34
17,837	33,828	68,31
17,884	34,543	72,08
18,392	34,670	85,01
20,474	35,592	86,93
21,746	37,221	88,47
22,830	41,730	89,82
25,416	50,69	106,0
28,045	52,40	124,6
31,544	53,47	126,1
31,919	54,00	132,8
32,007	54,10	

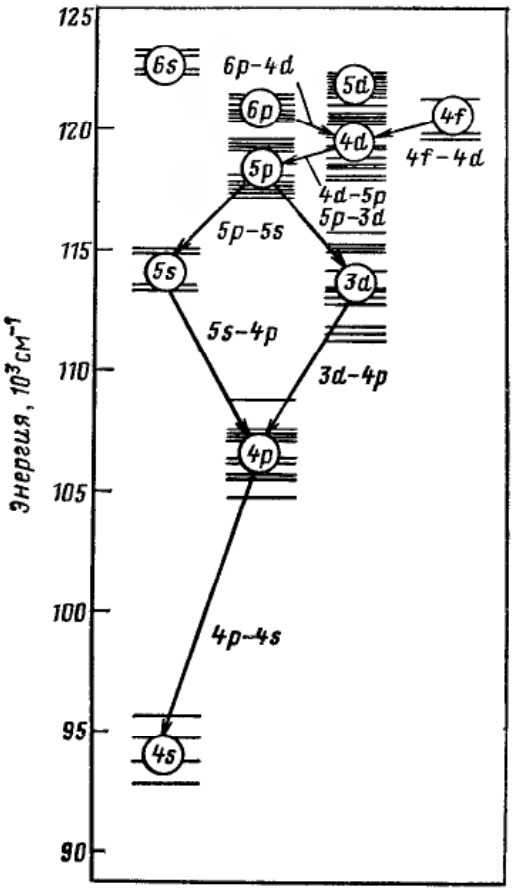


Рис. 34.2. Схема основных групп лазерных переходов в Ar [7]

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Ar (рис. 34.2). *Условия возбуждения: почти все переходы возбуждаются в непрерывном режиме; плотность тока для ионизованного* Ar 30—150 А/см² *при давлении* 1—80 Па; *для возбуждения переходов в ультрафиолетовой области спектра* ($\lambda < 0{,}33$ мкм) *необходима более высокая плотность тока; сильные линии* $\lambda = 0{,}351$ *и* 0,364 мкм *могут быть возбуждены в непрерывном режиме; переходы в инфракрасной области спектра* ($\lambda > 1{,}6$ мкм) *возбуждаются в слабом непрерывном разряде при давлении около* 7 Па

$\lambda_{возд}$, мкм					
IV	0,183730	II	**0,514532**		2,862
V	0,183733	II	0,528690		2,8776
IV	0,2113982	III	0,550220		2,8836
IV	0,2248840	II	0,64831		2,9273
IV	0,2513298	II	0,6730		2,9788
IV	0,2621377	II	0,68613		3,0454
IV	0,2624882		0,7503		3,0988
III	0,2753884	II	0,877186		**3,1325**
III	0,2884216		0,912297		3,1338
III	0,2855374		0,965778		3,6312
IV	0,2912924		1,0470		3,70138
IV	0,2926227	II	**1,092344**		3,708
III	**0,3002642**		1,1448		3,71439
III	0,302405		1,21396		4,2033
III	0,305484		1,24028		4,7138
III	0,333613		1,27022		4,9148
III	0,334472		1,40948		4,9199
III	0,335849		1,5046		4,9496
III	0,351112		1,6180		5,02338
III	0,351418		1,619395		5,1203
II	0,357661		1,652		5,1205
III	**0,363789**		1,6941		5,3897
III	0,37052		1,791437		5,4666
III	0,379532		**2,0616**		5,4680
III	0,385829		2,0986		5,8022
III	0,414671		2,1332		**5,8461**
III	0,418298		2,1534		6,0515
II	0,437075		2,2038		**6,7443**
II	0,448181		2,2077		6,9410
II	0,454505		2,31339		6,9429
II	0,457935		2,3966		**7,2147**
II	0,460956		2,5008		7,7982
II	0,465789		2,5487		7,8002
II	0,472686		2,5504		7,8042
II	**0,476486**		**2,5627**		12,138
II	**0,487986**		**2,5661**		12,188
II	0,488903		2,6542		15,032
II	**0,496507**		2,6836		15,037
III	0,49928		2,71529		26,937
II	**0,501716**		2,7357		26,956
II	0,506204		2,8195		
II	0,514179		2,8238		

Активная среда Kr. *Условия возбуждения: почти все линии в криптоне можно возбудить в непрерывном режиме; для ионизованного криптона необходима плотность тока* 50—200 А/см² *или* 7—10 кА/см² (*вакуумный ультрафиолет*); *давление* 1—30 Па

$\lambda_{возд}$, мкм					
IV	0,175641	II	0,512573		1,9211
V	0,183243	II	0,529831		2,04240
IV	0,195027	II	0,539865		**2,1165**
IV	0,196808	II	**0,568188**		**2,19020**
IV	0,2051082	II	0,575298		2,2475
IV	0,**2191916**	III	0,603717		2,4260
IV	0,2254638	II	0,60381		**2,52342**
IV	0,2338478	II	0,616880		2,6260
IV	0,2417843	III	0,631022		2,6281
IV	0,2649357	II	0,631276		2,86134
IV	0,2664398	II	0,641661		2,8656
IV	0,2741380	II	0,647088		2,9836
III	0,3049704	II	0,65100		2,9870
III	0,3124363	II	0,657012		3,0664
III	0,3239512	II	0,66029		3,0528
III	0,337496	II	0,676442		3,1508
III	**0,3507420**	II	0,687084		3,3401
III	0,356423	II	**0,7435764**		3,3411
III	**0,406737**		0,752546		3,4873
III	**0,413133**		0,7603		3,4885
III	0,415444	II	0,79314		3,774
III	0,417179	II	0,799322		3,956
III	0,422658		**0,810433**		3,9573
II	0,431781	II	0,828037		4,068
II	0,438654	II	0,85878		4,142
III	0,444329	II	0,86901		4,3736
II	0,457720		0,88058		4,3755
II	0,458285		0,8929		4,8760
II	0,461528		1,14582		4,8819
II	0,461915		1,31775		4,9983
II	0,463386		1,36225		4,9999
II	0,465016		1,44269		5,1298
II	**0,468041**		1,47648		5,2985
II	0,469**44**		1,4966		5,3004
II	**0,476243**		1,5330		5,5685
II	0,476573		1,68533		**5,5848**
II	**0,482517**		1,68965		5,6290
II	0,484659		1,6936		7,0565
III	0,501645		1,7843		7,3605
II	0,502**40**		1,8185		

Активная среда Xe. *Условия возбуждения: многие линии ионизованного* Xe *можно возбудить в непрерывном режиме; плотность тока* 70—200 А/см²; *при импульсном возбуждении многие линии в видимой области спектра генерируются одновременно; типичное давление* $(1—10)\cdot 10^{-4}$ Па; *в атомарном* Xe *все линии длиннее* 2,03 мкм *можно возбудить в непрерывном режиме*

$\lambda_{возд}$, мкм					
IV	0,2232442	IV	**0,3330869**	IV	0,380322
IV	**0,2315357**	IV	0,334974	IV	0,397302
III	0,247718	III	0,3454248	III	0,405005
IV	0,2526664	IV	0,348322	III	0,406048
III	0,2691939	III	0,359661	III	0,421401
IV	0,29837	IV	**0,3645478**	III	0,424024
III	0,3079738	III	0,366921	III	0,427259
IV	**0,3246922**	III	0,374571	III	0,428588
IV	0,3305957	IV	0,375979	IV	**0,430577**
III	0,330599	III	0,3780990	III	0,441314

III	0,443415	II	**0,597111**	2,6665
IV	0,455862	II	0,609361	2,8590
II	0,460303	III	0,61766	3,1069
IV	0,464759	III	0,623824	**3,2739**
IV	0,465073	II	0,627081	3,3085
III	0,467368	IV	0,62865	**3,3666**
III	0,468354	III	0,63435	3,4014
III	0,472357	III	0,63435	3,4335
III	0,474895	II	0,652865	**3,5070**
II	0,486249	II	0,66943	3,6210
III	0,486946	IV	0,669950	3,6509
II	0,488730	II	0,70723	3,6788
IV	**0,495414**	III	0,714894	**3,6849**
IV	0,496508	II	0,76186	**3,8666**
IV	0,500772	II	**0,782763**	**3,8940**
II	0,504492	II	**0,798800**	**3,9955**
IV	0,515703	II	0,823162	4,0196
IV	**0,515905**	II	0,833270	4,1516
III	0,523893	II	0,840919	4,5381
IV	0,525637	III	0,85716	4,5665
II	0,525992	II	0,858251	4,5694
IV	**0,526015**	II	**0,871617**	**4,6097**
II	0,526042		0,904539	**5,0230**
II	0,526195	II	0,905930	5,02441
II	0,531387	II	0,926539	**5,3551**
IV	0,534131	II	0,928854	5,4735
IV	0,534331	II	**0,969859**	**5,5739**
IV	**0,535297**		**0,979970**	5,6019
IV	**0,539461**	II	1,063385	6,3103
II	0,539525	II	1,0950	6,3137
III	0,540104		1,36562	**7,3147**
II	**0,541915**		1,60519	7,4294
IV	0,549933		1,73254	9,0040
III	0,552442		2,02623	9,7002
IV	0,55923		2,3193	11,289
II	0,565938		2,4825	11,296
II	0,57291		2,51528	12,263
II	0,575103		**2,6269**	12,913
II	0,589330		**2,65146**	18,500
IV	0,595565		2,6601	75,578

Активная среда Fe. *Условия возбуждения: импульсный разряд при диссоциации* $Fe(CO)_5$*; импульсное возбуждение паров* Fe *с* Ne, *а также фотодиссоциация* $Fe(CO)_5$ *излучением* KrF*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,360	0,4529	0,563
0,385	0,540	6,8470
0,395	0,558	8,4902

Активная среда Ni. *Условия возбуждения: импульсный разряд при диссоциации* $Ni(CO)_4$

$\lambda_{возд}$, мкм

II	0,79624	1,3968
II	0,79754	1,4550

Активная среда H. *Условия возбуждения: импульсный разряд в* H_2 *при* $P = 1{,}3$ Па *и* He *при* 470 Па

$\lambda_{возд}$, мкм

0,4340
0,4861
1,8751

Активная среда Na. *Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси паров* Na *при* $P = 0{,}13 \div 0{,}4$ Па *и* He *при* $P = 0.13 \div 1{,}3$ кПа: *фотодиссоциация галогенидов натрия*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,5866	1,1382
0,5890	1,1404

Активная среда K. *Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси паров* K *при* $P = 13$ Па *и* H_2 *при* $P = 400 \div 700$ Па: *фотодиссоциация паров* K_2 *излучением рубинового лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,4045	1,2523	6,4
0,7665	2,72	7,9
0,7699	3,140	12,5
1,17	3,15	15,95
1,2434	3,16	

Активная среда Rb. *Условия возбуждения: фотодиссоциация паров* Rb_2 *излучением рубинового лазера; оптическая накачка лазерами на красителях*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,4210	1,37	2,293
0,7619	1,48	2,79
0,7758	1,53	49,68
0,7800	2,254	50,93
0,7945		

Активная среда Cs. *Условия накачки: оптическая накачка паров* Cs_2 *излучением линии* He *с* $\lambda = 0{,}3880$ мкм. *Фотодиссоциация паров* Cs_2 *излучением ультрафиолетовых лазеров*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,4555	1,01	2,95	3,489
0,8521	1,360	3,010	3,613
0,8764	1,376	3,095	4,22
0,8943	1,47	3,2040	7,1871

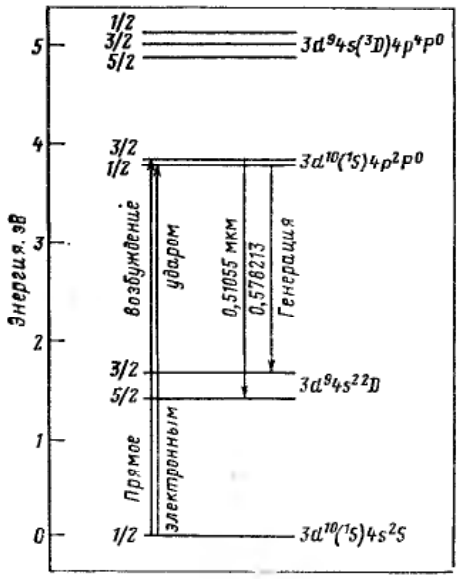


Рис. 34.3. Схема лазерных переходов с длинами волн 0,5105 и 0,5782 мкм в парах Cu [7]

Активная среда Cu (рис. 34.3). *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Cu *и* He

$\lambda_{возд}$, мкм

II	0,27032		0,5700	II	0,808858
II	0,24858		**0,578213**	II	0,8096
II	0,25063	II	0,72558	II	0,819228
II	0,25905	II	0,73999	II	0,8277
II	0,25988	II	0,740434	II	0,828321
II	0,450600	II	0,74382	II	0,851104
II	0,455592	II	0,766470	II	1,7438
II	0,467356	II	0,773868	II	1,7708
II	0,468199	II	0,777874	II	1,8004
II	0,485497	II	0,780519		1,8196
II	0,490973	II	0,780766		1,8228
II	0,493165	II	0,782566	II	1,8448
II	0,501261	II	0,784503	II	1,9154
II	0,502129	II	0,789583	II	1,9328
II	0,505178	II	0,794442	II	1,9479
II	0,506064	II	0,790257	II	1,9712
	0,510554	II	0,798817	II	2,0006

Активная среда Ag. *Условия возбуждения: непрерывный разряд с серебряным полым катодом и с* He *или* Ne *в качестве буферного газа*

$\lambda_{возд}$, мкм

II	0,22434	II	0,83795	II	1,7674
II	0,22774	II	0,84032		1,8380
II	0,31807	II	0,87476	II	1,8408
II	0,40859	II	0,8772	II	1,8463
II	0,47884	II	1,3759	II	1,8725
II	0,50273	II	1,5982	II	1,8795
II	0,64027	II	1,6462	II	1,8979
II	0,80054	II	1,6656		1,9370
II	0,82547	II	1,7203	II	1,9714
II	0,8263	II	1,7345	II	1,9823
II	0,83244	II	1,7478	II	2,0796

Активная среда Au. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Au *с* He; *непрерывный разряд с полым золотым катодом и* He *в качестве буферного газа*

$\lambda_{возд}$, мкм

	0,2428	II	0,29182	II	0,69403
II	0,25337	II	0,29594	II	0,75558
II	0,26165		0,3122	II	0,75929
	0,2676	II	0,55163	II	0,76005
II	0,28225	II	0,55221	II	0,76067
II	0,28470	II	0,62123	II	0,76351
II	0,28633		0,627818	II	0,82729
II	0,28882	II	0,67014	II	0,88676
II	0,28933	II	0,69029		

Активная среда Be. *Условия возбуждения: импульсное возбуждение паров* Be *с* He *или* Ne *в качестве буферного газа*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,4675
0,5272
1,2096

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Mg. *Условия возбуждения: импульсный и непрерывный разряды в парах* Mg *с* He, Ne *или* Ar

$\lambda_{возд}$, мкм

0,9218	II 2,40415	3,86573
0,9244	II 2,41245	4,20018
1,0952	3,67794	4,36269
1,0915	3,68154	

Активная среда Ca. *Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси паров* Ca *и* He; *оптическая накачка паров* Ca *ультрафиолетовым излучением; разряд с полым катодом*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,535	0,6162	II 0,866214
0,586	0,644981	1,9853
0,6102	0,6717	5,5457
0,6122	II **0,854209**	

Активная среда Sr. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Sr *с* He; *разряд с полым катодом*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,638075	**3,0111**
II 1,033014	6,4567
II 1,091797	

Активная среда Ba. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Ba *с* He, Ne, Ar *или* H_2; *разряд с полым катодом*

$\lambda_{возд}$, мкм

II 0,614172	2,4758	4,6706
II 0,649690	2,5515	4,7156
0,712033	2,5924	4,7171
1,1303	2,9057	5,0309
1,5000	2,9227	5,4798
1,82	**3,9578**	5,5636
1,9017	4,0069	5,8899
2,1568	4,33	6,4546
2,3254		

Активная среда Zn. *Условия возбуждения: импульсный или непрерывный разряд в парах* Zn *с* He, Ne *или* Ar; *непрерывный разряд с полым цинковым катодом; диссоциация в импульсном разряде* $Zn(CH_3)_2$

$\lambda_{возд}$, мкм

II 0,49116	II 0,610253	II 0,77325
II **0,492404**	II 0,747879	II 0,775786
II **0,58944**	II 0,758848	II 1,8308
II 0,6021	II 0,761290	II **5,0848**

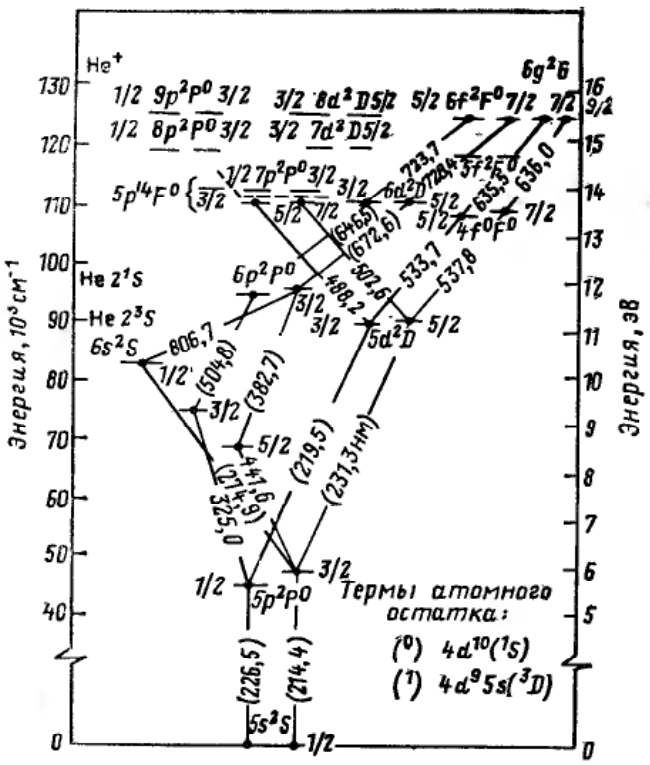


Рис. 34.4. Схема энергетических уровней и лазерных переходов в Cd II [5]. В скобках указаны λ, для которых наблюдались только спонтанные переходы

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Cd (рис. 34.4). *Условия возбуждения: импульсный или непрерывный разряд в парах* Cd *с* He *или* Ne; *непрерывный разряд с полым катодом из* Cd; *импульсное возбуждение при диссоциации* $Cd(CH_3)_2$

$\lambda_{возд}$, мкм

II	0,3250	II	0,63601		1,43
II	0,441563	II	0,72369		1,45
II	0,48820	II	0,78443		1,64
II	0,50259	II	0,80669		3,2882
II	0,533749	II	0,85300		13,185
II	0,537804	II	0,88778		14,578
II	0,63548		1,4		

Активная среда Hg. *Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси паров* Hg (0,13 Па) *и* He (130 Па); *разряд с полым катодом; импульсное возбуждение при диссоциации* $Hg(CH_3)_2$

$\lambda_{возд}$, мкм

	0,365	II	0,8622		1,5295
III	0,479701	II	0,8677	II	1,5555
III	0,5210	II	0,93968		1,6920
	0,5461	II	1,0583		1,6942
II	**0,56773**		1,11768		1,7073
II	**0,61499**		1,2222		1,71099
III	0,65015		1,2246		1,7329
II	0,7065		1,2545		1,8130
II	0,73466		1,2760		3,93
II	0,74181		1,2981		5,88
II	0,79447		1,3655		5,9817
II	0,85498		1,3675		6,49

Активная среда B. *Условия возбуждения: импульсный разряд в* BCl_3 *при* $P = 70$ Па

$\lambda_{возд}$, мкм

II	0,345134

Активная среда Al. *Условия возбуждения: электрический разряд с полым катодом: буферный газ* He *или* Ne

$\lambda_{возд}$, мкм

II	0,358744	II	0,705656
II	0,691996	II	0,747137
II	0,704206		

Активная среда Ga. *Условия возбуждения: импульсное возбуждение при диссоциации* $Ga(CH_3)_3$; *фотодиссоциация* GaI

$\lambda_{возд}$, мкм

0,4172		5,7534
1,7363		6,1460

Активная среда In. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* In *с* He *или* Ne, *импульсное возбуждение при диссоциации* $In(CH_3)_3$

$\lambda_{возд}$, мкм

0,4511		1,8732
0,468082		2,3779

Активная среда Tl. *Условия возбуждения: короткий разряд в* Tl (13 Па) *с* Ne *или* He: *импульсное возбуждение при диссоциации* $Tl(CH_3)_3$: *разряд с полым катодом*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,5152	0,6950	5,1059
0,53503	3,8125	10,449
0,5949		

Активная среда C. *Условия возбуждения: линии ионизованного* C *возбуждаются при импульсном разряде в* CO_2 *или воздухе; атомарные линии возбуждаются при непрерывном разряде в* CO *или* CO_2 (1.3 Па) *и* He *или* Ne (250 Па)

$\lambda_{возд}$, мкм

0,15482	0,51457	2,0645
0,15508	0,65780	3,4046
0,464745	0,67838	3,5155
0,465016	1,0691	5,5956
0,49541	1,4540	

Активная среда Si. *Условия возбуждения: линии ионизованного* Si *при импульсном разряде* PFe: *пары* Si *образуются при взаимодействии со стенками разрядной полости; атомарные линии при импульсном разряде* $SiCl_4$

$\lambda_{возд}$, мкм

0,455259	0,667193
0,456784	1,1984
0,634724	1,2034
0,637148	1,5883

Активная среда Ge. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Ge *с* He *или* Ne; *диссоциация* $GeCl_4$ *в импульсном разряде*

$\lambda_{возд}$, мкм		
0,513175	1,9809	
0,517865	2,0200	

Активная среда Sn. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Sn *с* Ne *или* He; *непрерывное возбуждение смеси* He *или* Ne *с* Sn *при* $P = 0{,}2$ Па

$\lambda_{возд}$, мкм		
0,5589	0,684405	1,062
0,579918	0,6579	1,074
0,645350	1,061	4,6146

Активная среда Pb. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Pb *с* He, Ne *или* Ar; *диссоциация* $Pb(CH_4)_4$ *в импульсном разряде*

$\lambda_{возд}$, мкм	
0,363954	0,72291
0,405779	3,1738
0,4062	7,1740
0,53721	7,9399

Активная среда N. *Условия возбуждения: для ионизованного* N — *импульсный разряд в воздухе*, N_2 *или* NH_3 *при* $P = 1{,}3 \div 13$ Па; *атомарные линии при импульсном разряде в* N_2 *или смеси* N_2 *с* He

$\lambda_{возд}$, мкм		
III 0,336734	II 0,566663	1,0568
IV 0,347867	II 0,567601	1,0611
IV 0,348296	**0,567956**	1,0623
II 0,399501	0,8594	1,34295
III 0,409732	0,87284	1,35818
III 0,410338	0,90455	1,45423
III 0,451088	0,93862	3,7942
III 0,451487	0,93921	3,8154
II 0,463055		

Активная среда P. *Условия возбуждения: импульсный разряд в* PF_5 *при* $P = 5$ Па; *импульсный разряд в парах* P *при* $P = 0{,}3 \div 30$ Па *с* He *или* Ne *в качестве буферного газа*

$\lambda_{возд}$, мкм		
IV 0,334769	II 0,616577	1,154
III 0,442208	0,667193	1,178
II 0,602421	0,784563	1,571
II 0,603421	1,008	1,648
II 0,604325	1,116	1,894
II 0,608786	1,119	2,060

Активная среда As. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* As *и* Ne (13 Па); *непрерывный разряд в смеси* As *и* He *с полым катодом; диссоциация* $AsCl_3$ *при импульсном разряде*

$\lambda_{возд}$, мкм		
II 0,538520	1,045	1,463
II 0,549695	1,061	1,8049
II 0,549773	1,124	1,807
II 0,555809	1,4255	1,9750
II 0,56516	1,1519	2,0277
II 0,583790	1,152	2,4460
II 0,617027	1,1521	2,9805
II 0,651174	1,294	5,2865
II 0,710272	1,412	

Активная среда Sb. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Sb (0,3 Па) *и* Ne (30 Па); *диссоциация* $Sb(CH_3)_3$ *в импульсном разряде*

$\lambda_{возд}$, мкм
0,61299
12,033

Активная среда Bi. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Bi *с* He *или в* $Bi(CH_3)_3$ *с* He

$\lambda_{возд}$, мкм		
III 0,456084	II 0,571921	II 0,80689
0,4722	III 0,75990	5,3284

Активная среда V. *Условия возбуждения: диссоциация* VCl_4 *в импульсном разряде*

$\lambda_{возд}$, мкм
2,0195
2,4473

Активная среда O. *Условия возбуждения: все линии ионизованного* O *в импульсном разряде при* $P = 0{,}13 \div 13$ Па *и плотности тока* 500—2000 А/см^2; *почти все линии атомарного* O *наблюдаются в непрерывном режиме в газовой смеси* O_2 *с* Ar *или* O_2 *с* Ne

$\lambda_{возд}$, мкм		
V 0,2640	II **0,434738**	0,844672
V 0,278139	II **0,435128**	0,844680
III 0,298378	II **0,441488**	2,652
III 0,304713	II **0,441697**	2,89
IV 0,306345	II 0,460552	4,5607
IV 0,338128	II 0,464914	4,5632
IV 0,338133	**III 0,559237**	5,981
IV 0,338554	II 0,66402	6,8161
II **0,374949**	0,672136	6,858
III 0,375426	0,844628	6,8731
III **0,375467**	0,844638	10,400
III **0,375988**		

Активная среда S. *Условия возбуждения: все линии ионизованной* S *в импульсном высокоточном разряде в* SO_2, SF_6 *или* H_2S *при* $P = 1{,}3 \div 7$ Па: *линии атомарного* S *в импульсном или непрерывном разряде в парах* S *с* Ne

$\lambda_{возд}$, мкм

III	0,2638964	II	**0,532088**	II	0,581935
III	0,3324859	II	**0,534583**		0,7725
III	0,3497332	II	**0,542874**		1,0455
III	**0,3709354**	II	**0,543287**		1,0636
II	0,492560	II	**0,545388**		1,402
II	0,50116	II	0,547374		1,5422
II	0,501424	II	0,556511		1,6543
II	0,503262	II	0,550990		2,4363
II	**0,516032**	II	**0,564012**		2,7799
II	**0,521962**	II	**0,564716**		3,3892

Активная среда Se. *Условия возбуждения: все линии возбуждаются в непрерывном режиме; плотность тока* 1,5—15 А/см^2; *газовая смесь* Se(0,7 Па) *и* He(0,8—1,1 кПа)

$\lambda_{возд}$, мкм

II	0,446760	II	**0,522751**	II	0,644425
II	0,460434	II	0,525307	II	0,649048
II	0,461877	II	0,525363	II	0,653995
II	0,464844	II	0,527111	II	0,706389
II	0,471823	II	**0,530535**	II	0,739199
II	0,474097	II	0,552242	II	0,767482
II	0,476365	II	0,556693	II	0,772404
II	0,476552	II	0,559116		0,777
II	0,484063	II	0,562313	II	0,779615
II	0,484496	II	0,569788	II	0,783881
II	0,489	II	0,574762	II	0,830952
II	**0,497566**	II	0,584268	II	**0,92493**
II	**0,499275**	II	0,586627	II	0,995515
II	**0,506865**	II	0,605596	II	**1,040881**
II	0,509650	II	0,606583	II	**1,258678**
II	0,514214	II	0,610196		6,3672
II	0,517598				

Активная среда Te. *Условия возбуждения: импульсный или непрерывный разряд в парах* Te; *диссоциация в импульсном разряде* $Te(CH_3)_2$

$\lambda_{возд}$, мкм

II	0,48429	II	0,57563	II	0,68851
II	0,50204	II	0,58511	II	**0,70391**
II	0,52564	II	**0,59361**	II	0,78017
II	**0,54498**	II	0,59726	II	0,79217
II	0,54540	II	**0,59747**	II	0,86046
II	**0,54791**	III	0,60145	II	0,87338
II	0,55702	II	0,60823	II	0,89721
II	0,55764	II	**0,62307**	II	0,88982
II	0,56405	II	0,62454	II	0,93779
II	**0,56662**	II	0,63497		3,1720
II	0,57081	II	0,65851		6,7595
II	**0,57416**	II	0,66486		7,7856
II	0,57559	II	0,66761		

Активная среда F. *Условия возбуждения: импульсный разряд в* F_2 *при* $P = 3$ Па *или в смеси* CF_4, SF_6, C_2F_6, NF_3 *с* He

$\lambda_{возд}$, мкм

III	0,275958	0,696635		0,74257
IV	0,282612	0,70394		0,74827
III	0,3121501	0,703745		0,748914
III	0,317413	0,712788		0,75150
II	0,320276	0,71298		0,7552235
II	0,402472	0,720237		0,775470
	0,6239651	0,72043		0,780022
	0,6348508	0,7310102		1,5900
	0,6413651	0,7398688		9,3462

Активная среда Cl. *Условия возбуждения: ультрафиолетовые линии ионизованного* Cl *генерируют только в импульсном режиме при* $P = 0{,}3$ Па; *линии видимого диапазона возбуждаются непрерывно при* $P = 7$ Па; *линии атомарного* Cl *возбуждаются в* HCl *или в смеси* Cl_3 *и* He

$\lambda_{возд}$, мкм

III	0,2632686	II	0,413250	II	0,522136
III	0,3191424	II	0,474042	II	0,539216
III	0,3392861	II	0,476871	II	0,609473
III	**0,3393444**	II	0,478134		0,9451
III	0,3530016	II	0,489685		1,3859
III	0,3560632	II	0,490483		1,3891
III	0,360210	II	0,491781		1,9755
III	0,361283	II	0,507829		2,0199
III	0,362268	II	0,510310		2,4466
III	0,3720436	II	**0.512776**		3,0664
III	0,3748770				

Активная среда Br. *Условия возбуждения: непрерывный разряд в* HBr; *импульсный разряд в* Br_2 *при* $P = 5$ Па

$\lambda_{возд}$, мкм

IV	**0,2362465**	II	**0,518238**	2,2854
IV	0,2581246	II	0,523826	**2,3511**
III	0,2787619	II	**0,533203**	2,714
II	0,474266	II	0,611756	**2,8375**
II	0,505463	II	0,616878	

Активная среда I. *Условия возбуждения: импульсный разряд в* I *при* $P = 13$ Па *и в* He *при* $P = 250 \div 500$ Па; *импульсный или непрерывный разряд в* HI *или в смеси* I *и* He

$\lambda_{возд}$, мкм

II	0,448855	II	0,658521	1,06
II	0,453379	II	0,606893	1,315
II	0,467440	II	0,620486	1,4542
II	0,467553	II	0,662235	1,553
II	0,493467	II	0,682523	2,5986
II	0,498692	II	0,690477	2,7572
II	0,521408	II	**0,703299**	3,0360
II	0,521627	II	0,713897	3,2363
II	**0,540736**	II	0,761850	3,4296
II	0,5419	II	0,773578	4,331
II	0,559312	II	**0,817001**	4,858
II	0,562569	II	0,825381	**4,8619**
II	**0,567808**	II	0,880428	**5,4972**
II	**0,576072**	II	0,887761	6,7198
II	**0,612749**		0,58	6,902
II	0,633997		1,01	9,326
II	0,651618		1,03	

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Mn. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Mn *и* He

$\lambda_{возд}$, мкм		
0,534106	0,553776	1,36267
0,542036	**1,28998**	1,38642
0,547064	1,32938	1,39975
0,551677	1,33190	

Активная среда Sm. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Sm *с* He, Ne *или* Ar

$\lambda_{возд}$, мкм			
1,912	**2,6998**	**3,4654**	**4,1368**
2,0482	**2,9663**	**3,5361**	**4,8656**

Активная среда Eu. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Eu *с* He, Ne *или* Ar

$\lambda_{возд}$, мкм		
II 0,6645	1,66	**5,0647**
II 0,9898	**1,7596**	5,2811
II 1,002	**2,5811**	**5,4292**
II 1,016	2,7174	5,7706
II 1,361	4,3202	5,9479
II 1,477	4,6935	6,0576

Активная среда Tm. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Tm *с* He, Ne *или* Ar

$\lambda_{возд}$, мкм		
1,304	1,500	1,973
1,310058	1,637914	1,994160
1,338008	**1,675404**	2,107
1,433973	1,7319	2,384515
1,448509	**1,958443**	

Активная среда Yb. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* Yb *с* He, Ne *или* Ar

$\lambda_{возд}$, мкм		
1,0322	II **1,6498**	2,0036
1,2548	1,7454	2,1181
II 1,2714	1,7977	II 2,1480
II 1,3453	II 1,8057	II **2,4377**
1,4280	1,9830	4,8009
1,4787		

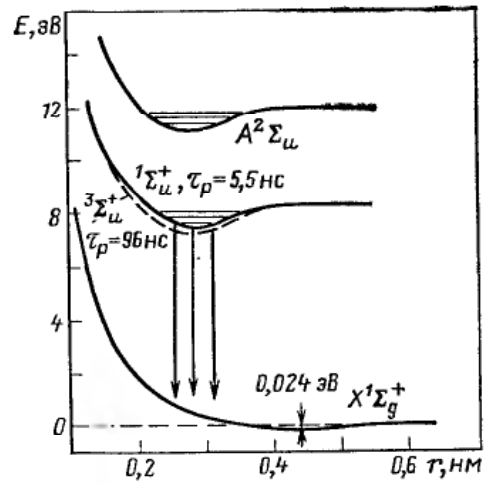


Рис. 34.5. Схема кривых потенциальной энергии и колебательных уровней молекулы Xe_2 [1]. Генерация наблюдается на переходах из устойчивых колебательных уровней состояния $^1\Sigma_u^+$ в отталкивательное состояние $^1\Sigma_g^+$; $\tau_р$ — радиационное время жизни верхнего рабочего состояния

Продолжение табл. 34.2

Лазерные переходы в двухатомных молекулах

Активная среда Xe_2 (рис. 34.5), Ar_2, Kr_2. *Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком благородных газов при высоком давлении*

Молекула	$\lambda_{возд}$, мкм
Xe_2	0,1722
Ar_2	0,1261
Kr_2	0,1457

Активная среда ArF, ArCl, KrF *и т. д. Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси благородных газов и галогенидов при высоком давлении; также поперечный разряд при атмосферном давлении*

Молекула	$\lambda_{возд}$, мкм	Молекула	$\lambda_{возд}$, мкм
ArF	0,1933	XeCl	0,30792
ArCl	0,1750	XeCl	0,30816
KrBr	0,2065	XeF	0,34875
KrCl	0,2229	XeF	0,35091
KrF	0,2481	XeF	0,35097
KrF	0,2484	XeF	0,35114
KrF	0,2485	XeF	0,35365
KrF	0,2495	XeF	0,35354
XeBr	0,2818	XeF	0 .483

Активная среда XeO,KrO. *Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси благородных газов и* O_2 *при высоком давлении*

Молекула	$\lambda_{возд}$, мкм	Молекула	$\lambda_{возд}$, мкм
XeO	**0,5300**	ArO	0,5377
XeO	0,5550	ArO	**0,55781**

Активная среда HgBr, HgCl. *Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком при высоком давлении; фотодиссоциация или диссоциация* $HgBr_2$ *в электрическом разряде*

Молекула	$\lambda_{возд}$, мкм	Молекула	$\lambda_{возд}$, мкм
HgBr	0,5018	HgBr	0,5042
HgBr	0,5020	HgBr	0,5046
HgBr	0,5023	HgBr	0,55762
HgBr	0,5026	HgBr	0,55835
HgBr	0,5039		

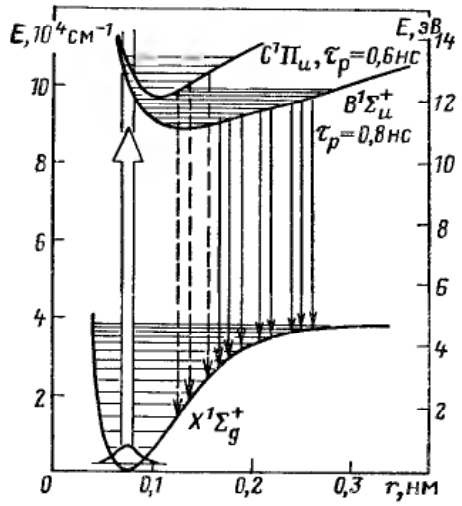


Рис. 34.6. Схема кривых потенциальной энергии и колебательных уровней лазера на молекулах H_2 [1]. Лазерные переходы на системе полос Лаймана ($B \to X$) отмечены вертикальными стрелками вниз (сплошные линии), переходы Вернера ($C \to X$) — пунктиром. Вертикальная стрелка из основного колебательного состояния $X_{v=0}$ вверх соответствует переходам при электронном возбуждении; τ_p — радиационное время жизни верхнего рабочего состояния

Продолжение табл. 34.2

Активная среда H_2 (рис. 34.6). *Условия возбуждения: импульсный разряд в* H_2 *при* $P = 13$ Па; *возбуждение электронным пучком* (400 кэВ) H_2 *при* $P = 1{,}3 \div 13$ кПа; *линии параводорода обозначены* H_2P

Молекула	$\lambda_{вак}$, мкм	Молекула	$\lambda_{вак}$, мкм
H_2	0,115976	H_2P	0,114462
H_2	0,116136	H_2P	0,114862
H_2	0,116617	H_2P	0,116003
H_2	0,117436	H_2P	0,116390
H_2	0,117586	H_2P	0,117456
H_2	0,118050	H_2P	0,117830
H_2	0,118936	H_2P	0,120536
H_2	0,120497	H_2P	0,120929
H_2	0,120688	H_2P	0,121767
H_2	0,121734	H_2P	0,122143
H_2	0,121900	H_2P	0,122874
H_2	0,122358	H_2P	0,123230
H_2	0,123004	H_2P	0,123833
H_2	0,123956	H_2P	0,124167
H_2P	0,109816	H_2P	0,124620
H_2P	0,110205	H_2P	0,125202
H_2P	0,111515	H_2P	0,126839
H_2P	0,111894	H_2	0,134226

Продолжение табл. 34.2

Молекула	$\lambda_{вак}$, мкм	Молекула	$\lambda_{вак}$, мкм
H_2	0,140264	H_2P	0,140728
H_2	0,143622	H_2P	0,143262
H_2	0,159340	H_2P	0,143757
H_2	0,159606	H_2P	0,144061
H_2	0,144049	H_2P	0,146017
H_2	0,146383	H P	0,146411
H_2	0,14942	H_2P	0,146841
H_2	0,149522	H_2P	0,148652
H_2	0,151867	H_2P	0,149171
H_2	0,152325	H_2P	0,151570
H_2	0,155345	H_2P	0,151994
H_2	0,15655	H_2P	0,153494
H_2	0,156725	H_2P	0,154493
H_2	0,157199	H_2P	0,155010
H_2	0,15743	H_2P	0,156629
H_2	0,157739	H_2P	0,156644
H_2	0,157919	H_2P	0,156753
H_2	0,157998	H_2P	0,157434
H_2	0,158077	H_2P	0,157771
H_2	0,159131	H_2P	0,157998
H_2	0,160448	H_2P	0,158110
H_2	0,160623	H_2P	0,158140
H_2	0,160751	H_2P	0,158899
H_2	0,160839	H_2P	0,159340
H_2	0,160902	H_2P	0,159926
H_2	0,160829	H_2P	0,160236
H_2	0,161033	H_2P	0,160594
H_2	0,161166	H_2P	0,160623
H_2	0,161319	H_2P	0,160829
H_2	0,16148	H_2P	0,160844
H_2	0,16165	H_2P	0,160961
H_2P	0,121946	H_2P	0,161019
H_2P	0,133856	H_2P	0,161033
H_2P	0,135984	H_2P	0,161165
H_2P	0,136799	H_2P	0,161318
H_2P	0,139895	H_2P	0,161485

Продолжение табл. 34.2

Молекула	$\lambda_{возд}$, мкм	Молекула	$\lambda_{возд}$, мкм
H III	0,752464	H III	1,305662
H III	0,834950	H III	1,316109
H III	0,887613	H III	1,50
H III	0,889882	H III	1,564193
H III	1,116220	H III	1,581950
H III	1,122205	H III	1,63

Активная среда D_2. *Условия возбуждения: импульсный разряд в* D_2 *при* $P = 13 \div 400$ Па; *для возбуждения ультрафиолетового излучения нужен короткий* (2,5 нс) *интенсивный* (*сотни килоампер*) *разряд*

$\lambda_{вак}$, мкм

0,111336	0,138879	0,16063
0,113770	0,143217	0,160650
0,114757	0,157585	0,160769
0,115650	0,158634	0,160681
0,118811	0,158642	0,160848
0,119753	0,158675	0,160955
0,120640	0,158714	0,161075
0,122800	0,158720	0,161080
0,123556	0,15890	0,161147
0,124239	0,15923	0,161165
0,124831	0,158983	0,161171
0,125329	0,159130	0,161198
0,115840	0,159137	0,161236
0,119005	0,159226	0,161251
0,119940	0,159257	0,161257
0,120821	0,160044	0,161318
0,124412	0,160086	0,161320
0,124997	0,160210	0,161324
0,130363	0,160354	0,161412
0,134590	0,160578	0,161658

$\lambda_{возд}$, мкм

0,827752	0,952367	1,477548
0,944156	0,953005	

Активная среда HD. *Условия возбуждения: импульсный разряд в* HD *при* $P = 13 \div 400$ Па

$\lambda_{вак}$, мкм

0,113864	0,151359	0,160365
0,114154	0,152989	0,160496
0,115198	0,156201	0,160465
0,117806	0,157136	0,160569
0,118995	0,157242	0,160647
0,119281	0,157267	0,160648
0,120103	0,158008	0,160674
0,121125	0,158085	0,160692
0,122837	0,158185	0,160747
0,124567	0,158253	0,160794
0,125276	0,158305	0,160827
0,130334	0,159378	0,160893
0,135507	0,159524	0,161005
0,140770	0,159713	0,161131
0,148843	0,160233	

$\lambda_{возд}$, мкм

0,917201

Продолжение табл. 34.2

Активная среда Na_2. *Условия возбуждения: оптическая накачка лазерным излучением с длиной волны* 473, 659, 454, 488 нм с He *в качестве буферного газа при* $P = 4$ кПа

$\lambda_{возд}$, мкм

0,5250	0,5417	0,791783
0,526333	0,5421	0,792947
0,5279	0,544150	0,793697
0,529952	0,544694	0,797474
0,529816	0,5453	0,797657
0,5338	0,5459	0,799091
0,5326	0,5472	0,799660
0,534283	0,5474	0,80011
0,5345	0,5485	0,8002
0,534930	0,5490	0,800840
0,536902	0,5491	0,80154
0,5375	0,549158	0,803650
0,5376	0,5504	0,803931
0,537814	0,5562	0,804447
0,5381	0,5568	0,805366
0,538497	0,5596	0,805611
0,538635	0,784930	0,8066
0,5394	0,786590	0,806943
0,540244	0,789740	0,80715
0,541311	0,789790	0,80859

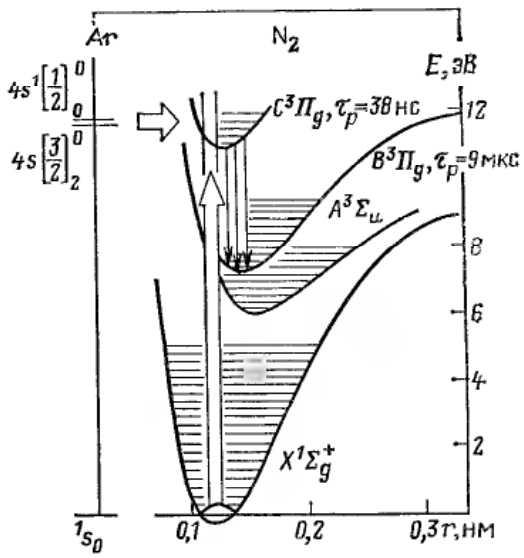


Рис. 34.7. Схема кривых потенциальной энергии и колебательных уровней лазера на молекулярном азоте в системе N_2+Ar [1]. Вертикальная стрелка из основного состояния $X_{v=0}$ вверх соответствует переходам при электронном возбуждении. Горизонтальная стрелка обозначает передачу энергии возбуждения с уровней аргона на верхний рабочий уровень азотного лазера; τ_p — радиационное время жизни рабочего состояния

Активная среда N_2. *Условия возбуждения: импульсный разряд высокой плотности в* N_2 *при* $P = 130 \div 500$ Па. *Возбуждение* N_2 *электронным пучком* (300—400 кэВ) *при* $P = 2{,}7$ кПа, *а также смеси* Ar *и* N_2 (рис. 34.7) *при высоком давлении*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,315756	0,315827	0,315870
0,315778	0,315832	0,315874
0,315798	0,315844	**0,315883**
0,315803	0,315853	0,315891
0,315816	**0,315861**	0,315900

0,315911	0,4058	0,7511799
0,315919	0,4278	**0,7512003**
0,3364909	0,7482187	0,7512569
0,3365425	0,748274	0,7513357
0,3365478	0,7485941	0,7514079
0,3366913	0,7486135	0,7515446
0,3369541	0,7486413	0,7515650
0,3369552	0,7486253	0,7517728
0,3369769	0,7487409	0,7518013
0,3369823	0,7488046	0,7574329
0,3369835	**0,7488246**	**0,758105**
0,3369907	0,7489107	0,758423
0,3370027	0,7489626	0,7586439
0,3370075	0,7489809	0,7587693
0,3370081	0,7490096	0,7589868
0,3370137	0,7490317	0,7591960
0,3370174	0,7491510	0,7593908
0,3370288	**0,7491705**	0,7594941
0,3370295	0,7492379	0,7597289
0,3370312	0,7493082	0,759870
0,3370381	0,7493716	0,7603477
0,3370438	0,7493910	0,7606374
0,3370466	0,7495086	**0,7607626**
0,3370474	0,7495465	**0,7608801**
0,3370555	0,7495660	**0,7609853**
0,3370562	0,7496024	0,7613612
0,3370608	0,7497256	0,7610759
0,3370619	**0,7497524**	0,7611082
0,3370665	0,7497728	**0,7611514**
0,3370677	0,7498898	0,7612105
0,3370714	0,7499013	0,7612528
0,3370726	**0,7499327**	**0,7613260**
0,3370749	0,7499593	**0,7615347**
0,3370758	0,7499825	0,7616994
0,3370782	0,7500071	**0,7617357**
0,3370797	0,7500646	0,7619288
0,3370812	0,7500734	0,7620844
0,3370816	**0,7501056**	0,7620943
0,3370826	0,7501295	**0,7621161**
0,3370919	0,7501404	0,7622235
0,3370986	0,7501553	0,7622565
0,3371031	0,7502139	**0,7622959**
0,3371075	0,7502729	0,7623256
0,3371082	0,7502768	0,7623264
0,3371113	**0,7503035**	0,7423311
0,3371121	**0,7503371**	0,7623582
0,3371135	**0,7503418**	0,7623686
0,3371143	**0,7503642**	0,7623918
0,3371172	0,7503669	0,7624220
0,3371266	0,7503697	**0,7624690**
0,3371307	0,7503838	**0,7624924**
0,3371366	0,7503960	**0,7625115**
0,3371392	**0,7503994**	**0,7625445**
0,3371421	0,7504106	0,7625709
0,3371429	**0,7504160**	0,7625770
0,3386428	**0,7504184**	0,7625812
0,3575460	0,7504274	0,7625906
0,3575798	**0,7504598**	0,7626007
0,3575980	0,7504768	0,7626044
0,3576112	0,7505113	0,7626114
0,3576194	0,7505710	**0,7626180**
0,3576250	0,7505903	0,7626207
0,3576320	0,7506063	**0,7626360**
0,3576571	0,7506356	0,7626560
0,3576613	0,7508145	**0,7626700**
0,3576778	0,7509890	**0,7626749**
0,3576899	**0,7510133**	0,7626826
0,3576955	0,7510923	0,7627806
0,3804	0,7511592	

Продолжение табл. 34.2

0,7628854	**0,8710273**	0,8889738
0,7629102	**0,8712956**	0,8890243
0,7630305	0,8713533	0,8891133
0,7631880	0,871450	0,8891769
0,7632446	**0,8715519**	0,8892149
0,7633348	0,871644	0,8892940
0,7633985	**0,8716718**	0,8896001
0,7634546	0,8717377	0,8898930
0,7634779	**0,8717970**	0,8899078
0,7635474	0,8718571	0,8901733
0,7636126	0,8718654	0,8902420
0,7636904	0,8719537	0,8902711
0,7637586	0,8719562	0,890372
0,7638274	0,8719562	0,8904419
0,7639571	0,8719791	0,890566
0,7639715	**0,8720251**	0,8906097
0,7640383	0,8720284	0,8906649
0,7640794	0,8720308	0,8906994
0,7641929	**0,8720419**	0,8907920
0,7642478	0,8720848	0,8908808
0,7644612	**0,8721155**	0,8908878
0,771206	0,8721327	0,8909451
0,7724562	**0,8721718**	0,8909527
0,7730032	0,8721971	0,8909750
0,7735040	**0,8722007**	0,8910132
0,7739632	**0,8722220**	0,8910480
0,7743859	**0,8722341**	0,8910612
0,775270	0,8722569	0,8911001
0,7752354	0,8722836	0,8911063
0,7753652	0,8723057	0,8911280
0,865331	0,8726333	0,8911502
0,865492	0,8728430	0,8911538
0,866089	0,8730453	0,8911608
0,866256	0,8732394	0,8911898
0,866345	**0,8734247**	0,8912139
0,866572	0,8735995	0,8918033
0,86676	**0,8737644**	0,8920184
0,8669223	0,8739162	0,8922249
0,866959	0,8740559	0,8924223
0,8671332	0,8742917	0,8926099
0,867554	0,884129	0,8927865
0,868281	0,8845349	0,8929509
0,8682937	0,8846598	0,8931019
0,868374	0,884758	0,8933580
0,868762	0,884920	0,965389
0,869136	0,885026	0,965846
0,8692580	0,885261	0,967599
0,869490	0,885460	0,967270
0,8696366	0,8856271	0,967758
0,8697945	0,885649	0,967943
0,8698263	0,8858470	0,968061
0,8699397	0,8861195	0,969552
0,8700670	0,886153	0,969879
0,8700684	0,886256	1,043588
0,8701481	0,886278	1,044261
0,8701718	0,886697	1,044992
0,8702541	0,886799	1,045519
0,8702681	**0,887121**	1,046117
0,8703093	0,887531	1,046669
0,870331	**0,887918**	1,047195
0,8703457	0,8880521	1,047691
0,8704549	0,888288	**1,047961**
0,8707478	0,8884527	1,048173
0,8710118	0,8886204	1,048634
	0,8886378	**1,049060**
	0,8887756	
	0,8889111	

Продолжение табл. 34.2

1,049478	1,230261	3,31149
1,049873	**1,231093**	3,31526
1,050231	1,231881	3,31801
1,050512	1,232624	3,45118
1,050717	1,233333	3,45758
1,05083	1,233994	3,46283
1,052259	1,234631	3,46709
1,052622	3,29372	3,47032
1,053093	3,30076	8,18161
1,053471	3,30665	8,20882

Активная среда Bi_2. *Условия возбуждения: оптическая накачка аргоновым лазером и лазерами на красителях*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,5929	0,6550	0,7398
0,6160	0,6809	0,7408
0,6239	0,7006	0,7439
0,6300	0,7013	0,7468
0,6339	0,7292	0,7471
0,6414	0,7301	0,7475
0,6422	0,7335	0,7482
0,6576	0,7364	0,7543
0,6582	0,7366	0,7551
0,6603	0,7376	

Активная среда S_2. *Условия возбуждения: фотодиссоциация под действием ультрафиолетового излучения или оптическая накачка лазером на красителе*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,365	1,0920	1,099
1,086	1,0923	1,100
1,0915	1,0941	1,1587
1,0917	1,0946	

Активная среда Te_2. *Условия возбуждения: оптическая накачка аргоновым лазером с длиной волны* 476,5 нм

$\lambda_{возд}$, мкм

0,5571	0,5786	0,6082
0,5575	0,5787	0,6085
0,5578	0,5790	0,6087
0,5579	0,5793	0,6089
0,5626	0,5794	0,6162
0,5643	0,5797	0,6165
0,5647	0,5798	0,6168
0,5649	0,5841	0,6170
0,5650	0,5849	0,6204
0,5696	0,5851	0,6278
0,5701	0,5857	0,6287
0,5711	0,5859	0,6288
0,5714	0,5865	0,6295
0,5715	0,5869	0,6379
0,5719	0,5870	0,6381
0,5720	0,5874	0,6388
0,5721	0,5924	0,6465
0,5724	0,5927	0,6473
0,5766	0,5934	0,6477
0,5767	0,5936	0,6484
0,5773	0,6002	0,6561
0,5780	0,6004	0,6569
0,5783	0,6005	0,6574
0,5784	0,6008	0,6581
0,5785	0,6009	

Продолжение табл. 34.2

Активная среда F_2. *Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси* Ne *и* F_2 *или* He *и* F_2; *также возбуждение в электрическом разряде*

$\lambda_{вак}$, мкм

0,15671
0,15748
0,15759

Активная среда Br_2. *Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком или в электрическом разряде смеси* Ar *и* Br_2

$\lambda_{вак}$, мкм

0,2915	0,61318	0,67456
0,55020	0,61368	0,67506
0,55053	0,63612	0,74582
0,58048	0,63654	0,74638
0,58090	0,63705	0,74641
0,61272	0,67408	0,74704
0,61316	0,67455	

Активная среда Cl_2. *Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси* Cl_2 (300 Па) *и* He (1,2 МПа)

$\lambda_{возд}$, мкм

0,2580

Активная среда I_2. *Условия возбуждения: оптическая накачка паров* I_2 *аргоновым лазером или лазером на красителе; ультрафиолетовые линии возбуждаются электронным пучком в смеси* Ar *и* CI_3D, *а также при накачке импульсными лампами*

$\lambda_{возд}$, мкм

0,3420	0,6592	1,1207
0,3423	0,6645	1,1214
0,3424	0,6936	1,1215
0,3428	0,7114	1,1224
0,5543	0,8144	1,1255
0,5550	0,8358	1,1327
0,5567	0,8578	1,1336
0,5680	0,8804	1,1347
0,5697	0,8813	1,1349
0,5745	0,9037	1,1350
0,5764	0,9047	1,1454
0,5815	0,9060	1,1464
0,5830	0,9274	1,20359
0,5880	0,9288	1,217
0,5905	0,9295	1,25623
0,5969	0,9305	1,25663
0,6025	0,9518	1,26324
0,6048	0,9545	1,274
0,6110	0,9555	1,27883
0,617482	0,9766	1,27945
0,617676	0,9963	1,28177
0,617868	0,9973	1,28210
0,617947	1,0019	1,28433
0,618193	1,0053	1,28478
0,618267	1,0225	1,2870
0,618441	1,0245	1,28722
0,618538	1,0255	1,28754
0,6198	1,0274	1,28931
0,6258	1,0534	1,28972
0,6330	1,0775	1,2925
0,6352	1,0788	1,294
0,6490	1,1068	1,304
0,6511	1,1073	1,30509

1,30536	1,31487	1,33636
1,30620	1,3153	1,33582
1,30748	1,3192	1,33624
1,30864	1,320	1,33644
1,30890	1,32916	1,338
1,31095	1,33029	1,34105
1,31130	1,3310	1,33108
1,31180	1,3324	1,34136
1,31205	1,3333	1,34155
1,31338	1,3349	1,34156
1,31371	1,33509	1,34211
1,31462	1,33530	1,34219

Активная среда ClF. *Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси* Ne, F_2 *и* Cl_2

$\lambda_{возд}$, мкм
0,285

Активная среда HF. *Условия возбуждения: возбуждение колебательных уровней в химических реакциях; оптическая накачка для возбуждения колебательно-вращательных переходов*

$\lambda_{вак}$, мкм

Полоса 1—0	*Полоса* 2—1	3,0052
2,41	2,6668	3,8482
2,43	2,6963	3,0935
2,45	2,7275	3,1411
2,48	2,7604	3,1912
2,551	2,7952	3,2438
2,579	2,8319	3,2991
2,6084	2,8705	*Полоса* 4—3
2,6396	2,9111	2,9221
2,6729	2,9539	2,9549
2,7075238	2,9989	2,9896
2,7440	3,0461	3,026
2,7826	3,0958	3,065
2,8231	3,1480	3,1454
2,8657	3,2029	3,1492
2,9103	3,2603	*Полоса* 5—4
2,9573	3,2206	3,0982
3,0064	*Полоса* 3—2	3,1350
3,0582	2,7902	3,1640
3,1125	2,8213	3,2151
3,1695	2,8542	3,258
3,2292	2,8890	3,3044
3,2919	2,9257	*Полоса* 6—5
	2,9644	3,333
		3,377

Чисто вращательные переходы

$v = 0$	$v = 1$	$v = 2$
10,1978	12,2619	10,5819
10,4578	12,7006	10,8117
10,7439	13,1877	13,2211
11,0573	13,7277	14,2881
11,4033	15,0163	20,9393
11,7854	18,8010	19,55
12,2082	20,1337	
12,6781	21,6986	$v = 3$
13,2009	36,5	11,5408
13,7841	42,4	19,1129
14,4405	50,8	20,3513
15,1744	63,4	21,7885
16,0215	84,4	
18,09	126,5	$v = 4$
19,35		19,915
20,835		

Активная среда DF. *Условия возбуждения: колебательные уровни в* DF *возбуждаются при химических реакциях, инициируемых электрическим разрядом, фотолизом или чисто химическим путем*

$\lambda_{вак}$, мкм

Полоса 3—1	*Полоса* 2—1	3,8903
1,836	3,6363	3,9272
1,844	3,6665	3,9654
1,857	3,6923	4,0054
Полоса 1—0	3,7310	4,0464
3,493	3,7651	4,0895
3,521	3,8007	4,1337
3,550	3,8375	4,1789
3,581	3,8757	*Полоса* 4—3
3,612	3,9155	3,8503
3,645	3,9565	3,8817
3,679	3,9995	3,9145
3,716	4,0435	3,9487
3,752	4,0893	3,9843
3,7901	4,1369	4,0212
3,8298	4,1862	4,0595
3,8707	*Полоса* 3—2	*Полоса* 4—3
3,9133	3,7563	$H^{35}Cl$
3,9572	3,7878	4,0054
4,0032	3,8206	4,0399
4,0502	3,8547	4,0759
		4,1135

Чисто вращательные переходы

$v = 0$

$H^{35}Cl$

13,8720	17,4923	22,8637
14,0994	17,9874	23,8485
14,3434	18,522	24,9367
16,2125	20,4106	26,1462
16,6085	21,1556	27,508
17,0340	21,9706	

Активная среда HCl. *Условия возбуждения: возбуждение при химических реакциях в смеси* H_2 *и* Cl_2O *или* Cl_2 *и* HI, *инициируемых электрическим разрядом или фотолизом; вращательные линии возбуждаются при импульсном разряде в смесях* Cl_2 *и* CH_3Cl, Cl_2 *и* CH_3Br *или* Cl_2, H_2 *и* $CClF_3$

$\lambda_{вак}$, мкм

Полоса 1—0	3,7383	3,9909
$H^{35}Cl$	3,7710	4,0295
3,5728	3,8050	$H^{37}Cl$
3,6026	3,8401	3,8536
3,6337	3,8768	3,8864
3,6660	3,9149	3,9205
3,6996	$H^{37}Cl$	3,9560
3,7341	3,7098	$H^{37}Cl$
3,7707	3,7408	16,664
3,8081	3,7735	17,997
$H^{37}Cl$	3,8074	19,122
3,6362	3,8425	$v = 1$
3,6685	*Полоса* 3—2	$H^{35}Cl$
3,7021	$H^{35}Cl$	17,125
3,7370	3,8509	17,575
Полоса 2—1	3,8840	18,035
$H^{35}Cl$	3,9181	18,555
3,7071	3,9536	19,7002

20,3455	$H^{37}Cl$	20,9991
21,0470	16,765	24,3178
21,8127	18,593	
22,6514	19,145	$v = 3$
23,5705	24,6177	19,783
24,5833	$v = 2$	19,821
25,7040	$H^{35}Cl$	
	19,183	

Активная среда DCl. *Условия возбуждения: возбуждение при химической реакции* $D_2 + Cl_2$, *инициируемой электрическим разрядом;* $P_{D_2} = 200$ Па, $P_{Cl_2} = 300$ Па

$\lambda_{вак}$, мкм		
Полоса 2—1	5,1811	5,3562
$D^{35}Cl$	5,2118	5,3889
5,0445	5,2435	5,4577
5,0743	5,2760	5,4935
5,1049	5,3097	5,5304
5,1363	5,3443	$D^{37}Cl$
5,1688	5,3799	5,3629
$D^{37}Cl$	$D^{37}Cl$	5,3956
5,0514	5,1879	5,4295
5,0811	5,2186	
5,1118	5,2503	*Полоса 5—4*
5,1431	5,2829	$D^{35}Cl$
Полоса 3—2	*Полоса* 4—3	5,5084
$D^{35}Cl$	$D^{35}Cl$	5,5423
5,1511	5,3244	5,5776
		5,6137

Активная среда HBr. *Условия возбуждения: возбуждение при химической реакции* $H_2 + Br_2$, *инициируемой импульсным разрядом;* $P_{H_2} = 200$ Па *и* $P_{Br_2} = 300$ Па

$\lambda_{вак}$, мкм		
Полоса 1—0	4,2295	$H^{81}Br$
$H^{79}Br$	4,2633	4,3255
4,0170	4,2988	4,3585
4,0470	4,3354	4,3931
4,0783	$H^{81}Br$	4,4307
4,1107	4,1658	4,4658
4,1442	4,1975	4,5047
$H^{81}Br$	4,2639	*Полоса* 4—3
4,0176	4,2994	$H^{79}Br$
4,0475	4,3359	4,5330
4,0788	*Полоса* 3—2	4,5691
4,1112	$H^{79}Br$	4,6070
4,1448	4,3250	4,4663
4,1796	4,3579	$H^{81}Br$
Полоса 2—1	4,3925	4,5335
$H^{79}Br$	4,4281	4,5696
4,1653	4,4652	4,6076
4,1970	4,5041	4,6467

Чисто вращательные переходы

$v = 0$	$v = 1$	22,855
19,399	19,988	31,368
20,360	21,546	32,799
20,896	30,445	40,526
20,949	31,849	
21,501	33,409	$v=3$
22,136	$v = 2$	23,436
30,948	22,226	29,786
32,469		

Активная среда DBr. *Условия возбуждения: возбуждение при химической реакции* $D_2 + Br_2$, *инициируемой импульсным разрядом:* $P_{D_2} = 80$ Па, $P_{Br_2} = 40$ Па

$\lambda_{вак}$, мкм		
Полоса 3—2	*Полоса* 4—3	6,1216
$D^{79}Br$	$D^{79}Br$	6,1562
5,8049	6,0209	6,1918
5,8620	6,0529	6,2289
5,8928	6,0858	*Полоса* 5—4
5,9246	6,1200	$D^{79}Br$
5,9573	6,1546	6,2566
	6,1903	6,2916
$D^{81}Br$	6,2272	6,3279
5,8629	$D^{81}Br$	$D^{81}Br$
5,8944	6,0225	6,2237
5,9261	6,0544	6,2581
5,9590	6,0873	6,2932
		6,3294

Активная среда NO. *Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси* NOCl (470 Па) *и* He (780 Па), *а также фотодиссоциация* NOCl *или* NO *в смеси с* NO_2

$\lambda_{вак}$, мкм		
1,2237	6,0267	6,2110
1,1069	6,0324	6,2191
2,6072	6,0386	6,2249
2,6380	6,0402	6,2328
5,8462	6,0419	6,2381
5,8549	6,0543	6,2511
5,8584	6,0628	6,2602
5,8706	6,0673	6,2645
5,8789	6,0801	6,2778
5,9036	6,0884	6,2865
5,9083	6,0934	6,2913
5,9423	6,1015	6,2998
5,9546	6,1204	6,3051
5,9550	6,1417	6,3136
5,9632	6,1538	6,3191
5,9673	6,1546	6,3274
5,9756	6,1576	6,3336
5,9799	6,1663	6,3764
5,9882	6,1792	6,3894
5,9931	6,1838	6,3980
6,0010	6,1921	6,4031
6,0054	6,1972	6,4262
6,0192	6,2055	6,4321

Продолжение табл. 34.2

Активная среда CN. *Условия возбуждения: возбуждение электрических и колебательных переходов при фотодиссоциации, а также при электрическом разряде в парах* HCN

$\lambda_{вак}$, мкм		
1,09966	1,10485	1,41911
1,09963	1,10445	1,41954
1,09965	1,10521	1,42005
1,09974	1,10603	1,42065
1,09987	1,10689	1,42132
1,10007	1,10726	1,42207
1,10031	1,10782	1,42289
1,10061	1,1879	1,42380
1,10096	1,10981	1,42478
1,10136	1,11090	1,42583
1,10082	1,11200	1,42696
1,10232	1,11321	1,42808
1,10288	1,41830	1,42945
1,10348	1,41849	1,42081
1,10414	1,41876	

Активная среда OH. *Условия возбуждения: фотолиз в смеси* O_3 *и* H_2*; импульсный разряд в смеси* O_3, H_2 *и* He*; вращательные переходы при импульсном разряде в смеси* SF_6, H_2 *и* O_2

$\lambda_{вак}$, мкм		
2,93432	14,640	14,655
2,96999	14,646	14,669
3,07877	14,662	15,256
3,11677	15,289	15,274
3,15697	15,294	18,455
3,32615	15,313	18,492
3,27653	18,788	18,502
$v=0$	18,828	18,532
12,273	18,849	19,555
12,279	18,878	19,594
12,660	20,05	19,619
12,663	21,48	19,650
13,073	21,57	20,87
13,079	23,14	20,93
13,088	23,26	22,33
13,525	25,11	22,45
13,538	25,28	24,07
13,547	27,47	24,18
13,557	27,71	26,12
14,043	$v=1$	26,30
14,059	13,632	$v=2$
14,067	13,642	
14,081	14,118	19,273
14,620	14,129	19,321

Активная среда OD. *Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси* SF_6, D_2 *и* O_2

$\lambda_{вак}$, мкм		
$v=0$	19,102	19,696
18,121	19,121	19,704
18,138	19,141	20,271
18,590	19,161	20,228
18,603	19,662	20,296
18,624	19,681	30,313

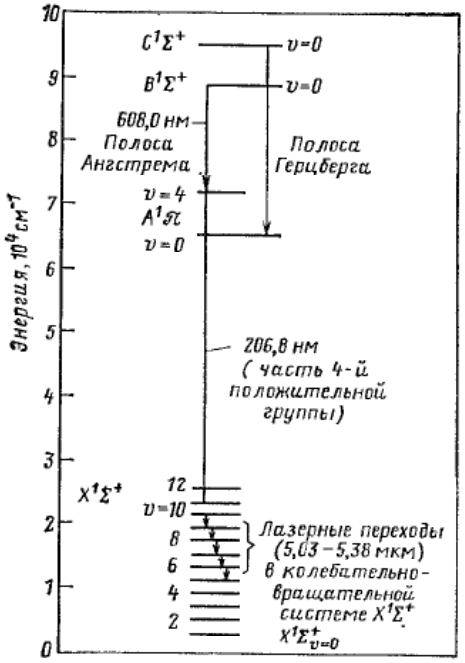


Рис. 34.8. Схема части лазерных переходов на молекулах CO, показывающая электронные переходы в полосе Ангстрема и колебательно-вращательные переходы в основном состоянии молекулы CO $X\ ^1\Sigma^+$ [7]

Продолжение табл. 34.2

Активная среда CO (рис. 34.8). *Условия возбуждения: возбуждение электронных состояний в импульсном разряде при высокой плотности тока; типичное давление для ультрафиолетовых линий 8* кПа, *для линий видимого диапазона* — 90—250 Па*; возбуждение вращательное колебательных переходов в импульсном или непрерывном разряде в смеси* CO *и* N_2 (*иногда с* He, Xe, Hg), *при газодинамическом расширении, в поперечном электрическом разряде, а также в химических реакциях*

$\lambda_{вак}$, мкм		
0,181085	0,483091	0,519825
0,187831	0,483202	0,519888
0,189784	0,483297	0,519952
0,195006	0,483602	0,558566
0,197013	0,483638	0,558903
0,450374	0,483658	0,559213
0,450508	0,518103	**0,559498**
0,450627	0,518355	**0,559757**
0,450728	0,518586	**0,560198**
0,450816	0,518793	**0,560380**
0,450888	0,518987	0,560536
0,450947	0,519145	0,560665
0,482082	0,519298	0,560769
0,482290	0,519426	0,560849
0,482483	0,519508	0,560856
0,482659	0,519531	0,560967
0,482820	0,519617	0,561054
0,482964	0,519633	0,561114
	0,519740	0,561149

0,604536
0,604983
0,605400
0,605787
0,606464
0,606756
0,607016
0,607243
0,607438
0,607604
0,607734
0,607752
0,607831
0,607899
0,608018
0,608102
0,608155
0,608175
0,658285
0,658805
0,659287
0,659729
0,660130
0,660438
0,660813
0,661093
0,661154
0,661427
0,661334
0,661426
0,661536
0,661695
0,661817
0,662102
0,662186
0,662216
2,3474
2,3769
2,4380
2,4344
2,4696
2,5019
2,5350
2,5689
2,6036
2,6392
2,6756
2,6886
2,6914
2,7129
2,7262
2,7290
2,7319
2,7511
2,7647
2,7676
2,7705
2,7903
2,8042
2,8071
2,8101
2,8306
2,8446
2,8476
2,8507
2,8892
2,8923
2,9288
2,9319
2,9351

2,9725
2,9757
2,9789
3,0174
3,0206
3,0668

Полоса 1—0

4,735872
4,745130
4,754501
4,763984
4,773582
4,783295
4,793123
4,803067
4,813129
4,823310
4,833609
4,844029
4,854569
4,865231
4,876016

Полоса 2—1

4,767821
4,776892
4,786076
4,795373
4,804785
4,814312
4,823954
4,833714
4,843591
4,853586
4,863700
4,873935
4,884291
4,894769
4,905369
4,916094
4,926943

Полоса 3—2

4,846781
4,856233
4,865803
4,875490
4,885296
4,895221
4,905267
4,915434
4,925723
4,936136
4,946672
4,957333
4,968120
4,979035
4,990016
5,001277
5,012578
5,023976
5,035544
5,047242
5,059073
5,071040
5,083144
5,095386
5,107766
5,120267

5,132949
5,145754

Полоса 4—3

4,880759
4,890016
4,899391
4,908883
4,918494
4,928238
4,938978
4,948052
4,958148
4,968369
4,978711
4,989181
4,999775
5,010497
5,021347
5,032321
5,043435
5,054676
5,066048
5,077554

Полоса 5—4

4,943828
4,953240
4,962772
4,972425
4,982220
4,992099
5,002121
5,012268
5,022539
5,032938
0,043462
5,054117
5,064899
5,075812
5,086856
5,098033
5,109343
5,120787
5,131252
5,144084
5,155938
5,167931
5,180064
5,192338
5,204755
5,217312
5,230020
5,242872
5,255870
5,269018
5,282316

Полоса 6—5

5,008369
5,017940
5,027635
5,037454
5,047397
5,057467
5,067663
5,077988
5,088440
5,099023

5,109734
5,120577
5,131555
5,142663
5,153909
5,165289
5,176806
5,188460
5,200254
5,21187
5,224262
5,236479
5,248840
5,261343
5,273997
5,286796
5,299744
5,312842
5,326091
5,339493
5,353049

Полоса 7—6

5,074432
5,084106
5,094028
5,104017
5,114134
5,124408
5,134757
5,145264
5,155902
5,166672
5,177575
5,188617
5,199792
5,211102
5,222555
5,234145
5,245874
5,257745
5,269759
5,281916
5,294218
5,306666
5,319261
5,332005
5,344899
5,357945
5,371143
5,384494
5,398001
5,411665

Полоса 8—7

5,142062
5,151996
5,162000
5,172164
5,182459
5,192888
5,203447
5,214142
5,224972
5,235937
5,247038
5,258279
5,269659
5,281183

5,292846
5,304651
5,316600
5,328694
5,340935
5,353322
5,365859
5,378545
5,391382
5,404372
5,417516
5,430815
5,444270
5,457884
5,471632
5,485591
5,499688

Полоса 9—8

5,108900
5,100430
5,092002
5,201370
5,211315
5,221392
5,231603
5,241946
5,252424
5,263039
5,273789
5,284678
5,295704
5,306870
5,318176
5,329624
5,341216
5,352955
5,364837
5,376865
5,389039
5,401364
5,413837
5,426463
5,439219
5,452172
5,465259
5,478502
5,491904
5,505464
5,519186
5,553070
5,547118
5,561330
5,575710

Полоса 10—9

5,096828
5,104413
5,112118
5,119944
5,127892
5,135961
5,272122
5,282243
5,292498
5,302890
5,313418
5,324085
5,334893

5,345838
5,356924
5,368153
5,379526
5,391045
5,402707
5,414516
5,426477
5,438584
5,450840
5,463249
5,475810
5,488524
5,501394
5,514421
5,527606
5,540950
5,554455
5,568122

Полоса 11—10

5,122753
5,129726
5,136819
5,144032
5,151366
5,158822
5,166400
5,174100
5,181924
5,189871
5,334601
5,354901
5,365340
5,375920
5,386640
5,397499
5,408504
5,419652
5,430943
5,442381
5,453966
5,465699
5,477588
5,489622
5,501808
5,514147
5,526640
5,539288
5,552093
5,565057
5,578179
5,591463
5,604909
5,618619
5,632293
5,646235

Полоса 12—11

5,179608
5,186476
5,193387
5,200459
5,207655
5,214974
5,222417
5,229984
5,237677
5,245496

5,429350
5,439978
5,450750
5,461666
5,472735
5,483932
5,495289
5,506793
5,518447
5,530252
5,542208
5,564315
5,566589
5,579010
5,591588
5,604325
5,617221
5,630278
5,643498
5,656881
5,670430
5,684145
5,698029
5,712083

Полоса 13—12

5,343257
5,351719
5,360314
5,369042
5,377903
5,386899
5,396031
5,405298
5,414703
5,424245
5,433926
5,516474
5,527444
5,505651
5,538558
5,549827
5,561252
5,572816
5,584536
5,595412
5,608443
5,620630
5,632975
5,645485
5,658148
5,670974
5,683961
5,697113
5,710431
5,723916
5,737568
5,751390
5,765384
5,779551
5,793891
5,808408
5,823103

Полоса 14—13

5,354648
5,362186
5,369854
5,377654
5,385585
5,393649
5,401846
5,410177
5,418642
5,427242
5,435978
5,444850
5,583870
5,594893
5,606068
5,617391
5,628872
5,640505
5,652298
5,664243
5,676348
5,688612
5,701037
5,713623
5,726379
5,739293
5,752373
5,765620
5,779036
5,792622
5,806380
5,820310
5,834415
5,848696
5,863154

Полоса 15—14

5,374479
5,381078
5,387807
5,394666
5,401656
5,408780
5,416030
5,423415
5,430932
5,438584
5,446369
5,454289
5,462344
5,470535
5,686687
5,698230
5,709930
5,721786
5,733804
5,745984
5,758322
5,770827
5,783496
5,796340
5,809343
5,822516
5,835859
5,583870
5,594893
5,606068
5,849374
5,863063
5,876926
5,890965
5,905182
5,919579
5,934157
5,948917

Полоса 16—15

5,746341
5,757944
5,769382
5,781150
5,793071
5,817413
5,829830
5,842415
5,855168
5,868096
5,881189
5,894455
5,907895
5,921510
5,935301
5,949271
5,963420
5,977751
5,992264
6,006963

Полоса 17—16

5,842407
5,854229
5,866221
5,878384
5,890704
5,903202
5,915865
5,928701
5,941711
5,954841
5,968257
5,981799
5,995510
6,009406
6,023483
6,037744
6,052189

Полоса 18—17

5,941314
5,953562
5,965936
5,978508
5,991256
6,004170
6,017267
6,030541
6,043400
6,05760
6,07142
6,08542
6,09960
6,11397
6,12852
6,14327

Полоса 19—18

6,030715
6,043187
6,055827
6,068653
6,081656
6,094841
6,108206
6,121753
6,135488
6,149406
6,163511
6,177806
6,192291
6,206969
6,221841

Полоса 20—19

6,097625
6,109989
6,122525
6,135248
6,148152
6,161240
6,174509
6,187966
6,201608
6,215438
6,229461
6,243673
6,258077
6,272677
6,287472
6,302466

Полоса 21—20

6,191453
6,204067
6,216856
6,229843
6,243012
6,256366
6,269915
6,283649
6,297578
6,311705
6,326023
6,340538
6,355252
6,370176
6,385283

Полоса 22—21

6,300749
6,313813
6,327064
6,340507
6,354144
6,367975
6,382004
6,410658
6,425284
6,440113
6,455148
6,470388
6,485838

Полоса 23—22

6,400168
6,413510
6,427033
6,640760
6,454686
6,468812
6,497679
6,512417
6,527363
6,542518
6,557884
6,573463

Полоса 24—23

6,502437
6,516055
6,529870
6,543890

6,558117
6,572552
6,587194
6,602046
6,617109
6,632387
6,647880
6,663590
6,679519

Полоса 25—24

6,607691
6,621596
6,635713
6,650037
6,664574
6,679326
6,694287
6,709469

Полоса 26—25

6,702067
6,716066
6,730277
6,744698
6,759342
6,774209
6,789276
6,804577
6,820100
6,835854

Полоса 27—26

6,842243
6,854639
6,871970
6,887152
6,902569
6,918218
6,934101

Полоса 28—27

6,942824
6,957669
6,972747
6,988057
7,003596
7,019371
7,035382

Полоса 29—28

7,076735
7,092158
7,107821
7,123720
7,139864
7,156250

Полоса 30—29

7,199637
7,215418
7,231448
7,247721
7,264248

Полоса 31—30

7,310709
7,326587
7,342742
7,359153
7,375822
7,392748

Полоса 32—31

7,441563
7,457822
7,474357
7,491175
7,508252
7,525593
7,543207

Полоса 33—32

7,593623
7,610553
7,627777
7,645277
7,663057
7,681105
7,734191
7,751571

Полоса 34—33

7,769230
7,787173
7,805408
7,823924

Полоса 35—34

7,879916
7,897740
7,915858
7,934266
7,952969
8,031109
8,049391
8,067991
8,086665
8,106093
8,206919
8,226011
8,245417
8,265146

$^{13}C^{16}O$

Полоса 7—6

5,303284
5,314516
5,325877
5,337376

Полоса 8—7

5,328437
5,339330
5,350355
5,367272
5,372811
5,384241
5,395810
5,407516

Полоса 9—8

5,377032
5,387850
5,398801
5,409888
5,421112
5,4322471
5,4439721
5,4556001
5,4673911
5,4793111
5,4913771
5,5035831

Полоса 10—9

5,437800	5,733698	6,039534
5,448674	5,741227	6,052565
5,459684	5,746076	6,063494
5,470881	5,752912	6,065767
5,482117	5,758611	6,075932
5,493543	5,764755	6,079138
5,505110	5,771303	0,088540
5,516821	5,776747	0,092683
5,528674	5,784148	6,101318
5,540673	5,788893	6,106404
5,552816	5,797155	6,114263
5,500027	5,798443	6,120296
5,510954	5,801198	6,127383
5,522022	5,810042	6,139855
5,533232	5,810319	6,140673
5,544580	5,813656	6,152366
5,556074	5,821796	6,154138
5,567715	5,826267	6,165049
5,574745	5,833703	6,167780
5,579476	5,839055	6,177904
5,585871	5,845769	6,181597
5,591415	5,851981	6,190935
5,597139	5,857987	6,195595
5,603490	5,865079	6,204140
5,608550	5,870367	6,209772
5,615709	5,882903	6,217521
5,620109	5,892408	6,230817
5,628080	5,895604	6,231077
5,631813	5,904387	6,233577
5.640600	5,908465	6,244817
5,643666	5,916519	6,256511
5,651276	5,921487	6,258735
5,653272	5,928814	6,289624
5,655664	5,934676	6,272833
5,662607	5,941269	6,282915
5,667813	5,948030	6,287118
5,674081	5,953887	6,296385
5,680114	5,964829	6,301586
5,685704	5,966669	6,310036
5,685704	5,976868	6,323871
5,692566	5,979617	6,337216
5,697477	5,989075	6,349964
5,705170	5,992728	6,350412
5,709398	6,001439	6,352094
5,717932	6,006059	6,363789
5,721472	6,013970	6,366487
5,729687	6,019459	6,377348
5,730846	6,026667	6,381068
	6,033077	6,391091
		6,405026

Многоатомные молекулы

Активная среда Xe_2Cl [8]. *Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси* Ar, Xe *и* CCl

$\lambda_{вак}$, мкм
0,518

Активная среда Xe_2Br [9]. *Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком смеси* Ar, Xe *и* $CHBr_3$

$\lambda_{вак}$, мкм
0,440

Активная среда Kr_2F [9]. *Условия возбуждения: возбуждение электронным пучком* Ar, Kr *и* NF_3

$\lambda_{вак}$, мкм
0,430

Активная среда O_3. *Условия возбуждения: оптическая накачка* CO_2*-лазером*

$\lambda_{вак}$, мкм
121
163,61
171,5

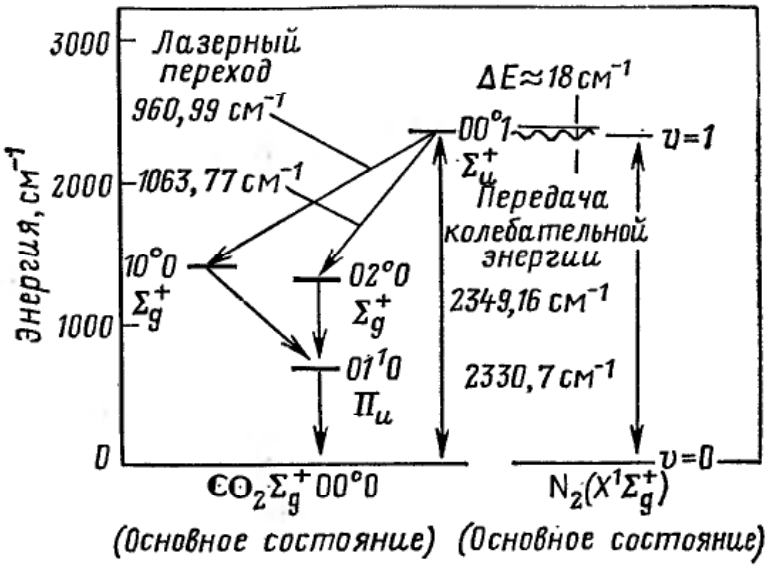


Рис. 34.9. Схема энергетических уровней молекул N_2 и CO_2 [1]. Отсчет энергии ведется от основных состояний $N_2(X'\Sigma_{g\ v=0}^{+})$ и CO_2 (00°0). Показаны селективное возбуждение уровня 00°1 молекулы CO_2 путем передачи энергии с колебательного уровня $v=1$ молекулы N_2 и лазерные переходы между уровнями CO_2

Активная среда CO_2. *Условия возбуждения: непрерывный разряд в смеси* CO_2, N_2 *и* He (рис. 34.9) (*соотношение в смеси* 1:2,5:10); *возбуждение в продольном разряде с прокачкой газовой смеси, в режиме газодинамического лазера (ГДЛ); химический* CO_2*-лазер с резонансной передачей энергии возбуждения от молекул* HF *или* DF; *импульсное возбуждение в поперечном разряде при высоком давлении (TEA); максимальная мощность* (10,6 мкм) 250 кВт (*в режиме ГДЛ*), *энергия* 1000 Дж (*в режиме TEA*)

$\lambda_{вак}$, мкм

Молекула $^{12}C^{16}O_2$

Полоса 102—101

4,3203	4,3612	4,3745
4,3249	4,3644	4,3779
4,3276	4,3677	4,3814
4,3549	4,3711	4,3849
4,3580		

Молекула $^{12}C^{18}O_2$

Полоса 101—100

4,314	4,371	4,385
4,340	4,377	4,392
4,354	4,382	4,398
4,346		

Молекула $^{13}C^{16}O_2$

Продолжение табл. 34.2

Полоса 001—020

9,0702655	9,2605258	9,6035727
9,0757663	9,2713577	9,6212185
9,0814571	9,2824434	9,6391656
9,0873410	9,2937852	9,6574156
9,0934211	9,3053853	9,6750700
9,0997003	9,3172460	9,6948301
9,1061815	9,3293695	9,7139973
9,1128676	9,3417579	9,7334730
9,1197615	9,3544134	9,7532586
9,1268660	9,3673380	9,7733552
9,1341839	9,3805340	9,7937640
9,1417179	9,3940033	9,8144862
9,1494708	9,4147242	9,8355229
9,1574453	9,4288857	9,8568751
9,1656440	9,4433275	9,8785439
9,1740695	9,4580515	9,9005300
9,1827244	9,4730598	9,9228344
9,1916114	9,4883540	9,9454579
9,2007329	9,5039361	9,9684012
9,2100915	9,5198079	9,9916650
9,2196895	9,5359711	10,0152438
9,2295296	9,5524275	10,0391561
9,2396141	9,5691788	10,0633844
9,2499453	9,5882267	10,0879349

Полоса 001—100

9,9985568	10,2331666	10,6531558
10,0049238	10,2466246	10,6745861
10,0115934	10,2603814	10,6963859
10,0185643	10,2744384	10,7185600
10,0258352	10,2887964	10,7411135
10,0334048	10,3034581	10,7640517
10,0412720	10,3184241	10,7873802
10,0494358	10,3336965	10,8111046
10,0578953	10,3492772	10,8352307
10,0666497	10,3651683	10,8597648
10,0756984	10,3813718	10,8847131
10,0850408	10,3978901	10,9100823
10,0946764	10,4232632	10,9358790
10,1046049	10,4405795	10,9221103
10,1148262	10,4582196	10,9887835
10,1253400	10,4761866	11,0159060
10,1361464	10,4944835	11,0434858
10,1472454	10,5131136	11,0715308
10,1586374	10,5320802	11,1000493
10,1703225	10,5513866	11,1290499
10,1823014	10,5710372	11,1585415
10,1945745	10,5910352	11,1885334
10,2071425	10,6113848	11,2190349
10,2200062	10,6320902	11,2500559

Полоса 002—021

9,209171	9,352366	**9,589785**
9,217773	9,364555	**9,606753**
9,226615	9,377018	**9,624027**
9,235699	9,389757	9,641609
9,245029	9,402774	9,655900
9,254607	9,450554	9,677702
9,264436	9,464848	9,696217
9,274517	9,479432	9,715046
9,284854	9,494307	9,734191
9,295448	9,509476	9,753653
9,306302	9,524939	9,773433
9,316821	9,540700	9,793533
9,328800	**9,556760**	9,813954
9,340448	**9,573121**	

Продолжение табл. 34.2

Полоса 002—101

10,146624	10,337367	**10,626664**
10,157295	10,355455	**10,647099**
10,168257	10,367847	**10,667888**
10,179508	10,383545	**10,689036**
10,191050	10,399550	**10,710547**
10,202883	10,415866	10,732425
10,215008	10,458029	10,754676
10,227424	10,475449	10,777305
10,240133	10,493192	10,800317
10,253135	10,511259	10,823718
10,266431	10,529654	10,847513
10,280023	10,548380	10,871709
10,293911	10,567440	10,896312
10,380097	10,586838	10,921327
10,322582	10,606578	

Полоса 003—102

10,288987	10,420594	10,706519
10,302426	10,53097	10,727749
10,316157	10,54916	10,749339
10,330184	10,56762	10,771295
10,344505	10,58646	10,793621
10,359124	10,60562	10,816324
10,374040	10,665124	10,839408
10,389256	10,685646	10,862879
10,404773		

Полоса 004—103

10,55376	10,5900
10,57170	10,60858

Полоса 001—110

10,591025	10,930707	11,007301
10,789077	10,942351	11,015934
10,890194	10,951486	11,029744
10,900964	10,972615	11,083630
10,921469	10,985266	

Полоса 011—110

10,50816	10,61421	11,06069
10,51001	10,92146	11,07582
10,52029	10,93070	11,08363
10,52277	10,94235	11,09947
10,53273	10,95148	11,10693
10,54550	10,96361	11,12354
10,54919	10,97261	11,13062
10,55859	10,98526	11,14803
10,56284	10,99409	11,15468
10,57201	11,00730	11,17295
10,57678	11,01593	11,17914
10,58575	11,02974	11,19830
10,59982	11,03813	11,20398
10,60556	11,05258	11,22408

Полоса 011—030

10,9735	11,1000	11,1980
10,9950	11,1070	11,2035
11,0165	11,1235	11,2235
11,0300	11,1315	11,2295
11,0385	11,1485	11,2495
11,0535	11,1555	11,2545
11,0610	11,1736	11,2770
11,0760	11,1790	11,2805
11,0850		

Полоса 012—111

10,53907	10,5639	10,60362
10,54173	10,58112	10,60885
10,55455		

Полоса 101—200

10,51027
10,54271

Полоса?

13,144	14,16	17,029
13,154	14,19	17,036
13,159	14,21	17,048
13,541	16,586	17,370
13,87	16,597	17,376
14,1	17,023	17,390

Молекула $^{12}C^{18}O_2$

Полоса 001—020

8,98770094	9,15508653	9,39730489
8,99496997	9,16569469	9,41181219
9,00240216	9,17649187	9,42653076
9,00999899	9,18747931	9,44146159
9,01776190	9,19865824	9,45660568
9,02569233	9,21002991	9,47196399
9,03379171	9,22159552	9,48753750
9,04206146	9,23931022	9,50332713
9,05050297	9,25136594	9,51933381
9,05911764	9,26361978	9,53555845
9,06790685	9,27607290	9,55200192
9,07687197	9,22872646	9,56866511
9,08601437	9,30158160	9,58554884
9,09533538	9,31463943	9,60265396
9,10483634	9,32790109	9,61998126
9,11451859	9,34136768	9,63753153
9,12438343	9,35504028	
9,13443217	9,36891998	
9,14466611	9,38300783	

Полоса 001—100

10,10434660	10,23981204	10,50639411
10,11295490	10,25237519	10,52476294
10,12186285	10,2652509 5	10,54349163
10,13107088	10,27844106	10,56258410
10,14057947	10,29194733	10,58204439
10,15038920	10,30577171	10,60187671
10,16050076	10,38758981	10,62208541
10,17091494	10,40353724	10,64267502
10,18163264	10,41982107	10,66365020
10,19265484	10,43644425	10,68501579
10,20398263	10,45340986	10,70677681
10,21561722	10,47072112	10,72893842
10,22755988	10,48838137	

Молекула $^{13}C^{16}O_2$

Полоса 001—020

9,59239947	9,73558466	9,97528536
9,60168999	9,74869533	9,99353402
9,61125719	9,76211913	10,01213398
9,62110404	9,77585872	10,03108747
9,63123346	9,78991669	10,05039672
9,64164836	9,80429565	10,07006390
9,65235161	9,85718656	10,09009116
9,66334607	9,87304135	10,11048062
9,67463455	9,88923095	10,13123435
9,68621987	9,90575779	10,15235439
9,69810480	9,92262428	10,17384275
9,71029210	9,93983281	10,19570139
9,72278448	9,95738572	

Полоса 001—100

10,58841900	11,04470940	11,61726318
10,60062644	11,06501204	11,63030402
10,61310290	11,08562903	11,64363687
10,62584867	11,10656357	11,65726303
10,63886409	11,12781897	11,67118389
10,65214962	11,14939871	11,68540097
10,66570577	11,17130639	11,69991589
10,67953319	11,19354572	11,71473039
10,69363257	11,21612059	11,72984633
10,70800473	11,23903501	11,81846619
10,72265056	11,26229313	11,83559484
10,73757106	11,28589928	11,85304268
10,75276730	11,30985791	11,87081258
10,76824046	11,33417365	11,88890760
10,78399183	11,35885125	11,90733089
10,80002276	11,38389568	11,92608578
10,81633473	11,40931204	11,94517571
10,83292931	11,49282306	11,96460427
10,84980818	11,50270688	11,9843752 1
10,86697309	11,51287542	12,00449241
10,88442594	11,52332884	12,02495992
10,90216870	11,53406738	12,04578194
10,92020346	11,54509140	12,06696282
10,93853242	11,55640135	12,08850708
10,96658256	11,56799780	12,11041941
10,98565737	11,57988138	12,13270467
11,00503495	11,59205288	12,15536788
11,02471801	11,60451316	12,17841426

Полоса 001—020

9,49185112	9,64624766	9,88117435
9,49995782	9,65773242	9,89685583
9,50826101	9,66944390	9,91279050
9,51676274	9,68138381	9,92897965
9,52546505	9,69355383	9,94542451
9,53436995	9,70595561	9,96212632
9,54347943	9,71859080	9,97908626
9,55279546	9,75121048	9,99630549
9,56231997	9,76467517	10,01378513
9,57205489	9,77838035	10,03152628
9,58200213	9,79232753	10,04952999
9,59216355	9,80651821	10,06779729
9,60254101	9,82095385	10,08632916
9,61313635	9,83563588	10,10512655
9,62395138	9,85056572	10,12419038
9,63498789	9,86574476	10,14352152

Молекула $^{14}C^{16}O_2$

Полоса 001—100

11,329	11,677	11,794
11,346	11,700	11,819
11,364	11,723	11,843
11,382	11,746	11,868
11,400	11,770	

Молекула $^{12}C^{18}O_2$

Полоса 100—010

16,596	17,596	17,821
16,780	17,639	17,915
16,927	17,684	17,962
16,970	17,730	18,010
17,280	17,775	18,053
17,463		

Активная среда NO_2 [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм
11,0
16,63

Активная среда CO_2 [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамическоео лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм
6,26
11,1

Активная среда N_2O. *Условия возбуждения: импульсный и непрерывный разряды в смеси* N_2O, N_2 *и* He (*соотношение в смеси* 1:3,5:40) *при* $P = 1{,}7$ кПа; *оптическая накачка лазером на* HBr (4,465 мкм), *в режиме газодинамического лазера* (9,48 и 10,65 мкм) [6]

$\lambda_{вак}$, мкм

Полоса 001—010

9,48

Полоса 001—100

10,3456	10,5602	10,8000
10,3532	10,5692	10,8104
10,3609	10,5761	10,8208
10,3687	10,5872	10,8312
10,3765	10,5963	10,8418
10,3843	10,6054	10,8523
10,3922	10,6146	10,8629
10,4001	10,6239	10,8736
10,4081	10,6332	10,8844
10,4161	10,6426	10,8952
10,4242	10,65	10,9061
10,4323	10,6614	10,9170
10,4405	10,6710	10,9280
10,4570	10,6806	10,9390
10,4653	10,6903	10,9501
10,4737	10,6999	10,9613
10,4821	10,7097	10,9726
10,4906	10,7195	10,9839
10,4991	10,7294	10,9953
10,5077	10,7393	11,0067
10,5163	10,7493	11,0182
10,5250	10,7593	11,0298
10,5337	10,7694	11,0415
10,5425	10,7796	
10,5513	10,7898	

Полоса 002—101

10,40331	10,55089	10,80453
10,41107	10,55958	10,81471
10,41889	10,56832	10,82495
10,42676	10,57712	10,83524
10,43468	10,58596	10,84560
10,44265	10,59486	10,85601
10,45067	10,60382	10,86648
10,45874	10,61282	10,87701
10,46686	10,62189	10,88760
10,47503	10,63100	10,89825
10,48325	10,72517	10,90896
10,49157	10,73489	10,91973
10,49985	10,74468	10,93056
10,50823	10,75450	10,94145
15,51666	10,76939	10,95241
10,52513	10,77434	10,96342
10,53367	10,78435	10,97450
10,54225	10,79441	10,98564
		10,99684

Активная среда S_2O [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм
12,87
20,57

Активная среда OCS. *Условия возбуждения: импульсный разряд в* OCS *или смесях* OCS *и* He, OCS *и* N_2, OCS *и* CO, OCS *и* CO + He; *оптическая накачка импульсным* CO_2*-лазером*

$\lambda_{вак}$, мкм
3,428

Полоса 001—100

8,2388	8,3654	8,3962
8,2416	8,3685	8,3999
8,2439	8,3715	8,4024
8,2518	8,3746	8,4055
8,2543	8,3779	8,4065
8,2571	8,3809	8,4117
8,2595	8,3839	8,4146
8,2623	8,3870	8,4178
8,2645	8,3900	8,4213
8,2673	8,3930	8,4243
8,3625		

Полоса?

18,983	123,0
19,057	132,0

Активная среда CH_2 [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм
4,76
5,26

Активная среда CS_2. *Условия возбуждения: в смеси* CS_2 (13 Па) *и* N_2 (250 Па) *с прокачкой рабочей среды; перед смешиванием* N_2 *возбуждается в непрерывном разряде; в поперечном разряде при атмосферном давлении с предыонизацией электронным пучком*

$\lambda_{вак}$, мкм

11,482	11,510	11,531
11,489	11,517	**11,538**
11,596	11,524	**11,545**
11,503		

Молекула $^{13}C^{32}S_2$

11,960	**11,986**	**12,241**
11,965	**12,217**	12,249

Активная среда HCO [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

7,15
16,1

Активная среда DCO [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

9,92

Активная среда FCO [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

8,15
11,90

Активная среда COS [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

6,43
8,24

Активная среда HCN. *Условия возбуждения: импульсный разряд в различных газовых смесях, к примеру* CH_4 *и* NH_3, CH_4 *и* N_2; *многие линии возбуждаются также непрерывно; в режиме газодинамического лазера* (3,69, 7,19, 7,63 мкм) [6]

$\lambda_{вак}$, мкм

3,69	116,132	284,0
7,19	126,164	309,7140
7,63	128,629	310,8870
81,554	130,838	335,1831
96,401	134,932	**336,5578**
98,693	138,768	372,5283
101,257	165,150	538,2
110,240	201,059	545,4
112,066	211,001	676,0
113,311	222,949	773,5

Активная среда DCN. *Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси* D_2 *и* BrCN *или* CD_4 *и* ND_3; *некоторые линии возбуждаются также непрерывно; в режиме газодинамического лазера* (4,31 и 12,62 мкм) [6]

$\lambda_{возд}$, мкм

4,31	189,9490	194,7644
12,62	190,0080	204,3872
181,789	194,7027	

Активная среда HNC [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

6,68

Активная среда FCN [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

8,25

Активная среда ClCN [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

5,44
6,81

Активная среда BrCN [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

5,38
6,16

Активная среда ICN [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

5,93
6,45

Активная среда NH_2 [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

15,4

Активная среда NF_2 [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

18,8
25,4

Активная среда FNO [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

9,28

Активная среда ClNO [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

8,24

Активная среда BrNO [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

6,52

Активная среда H_2O. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* H_2O *при* $P = 50 \div 130$ Па; *некоторые линии возбуждаются также непрерывно; в режиме газодинамического лазера* (4,19 и 4,57 мкм) [6]

$\lambda_{вак}$, мкм

2,28	4,77	7,287
4,19	7,095	7,299
4,57	7,206	7,392

7,427	32,924	49,430
7,459	33,308	53,910
7,545	**33,329**	55,000
7,567	34,60	55,088
7,592	35,017	56,129
7,709	35,383	57,659
7,711	35,833	57,799
7,712	36,606	66,800
7,742	37,848	66,903
9,4773	38,086	67,169
9,570	39,695	72,856
11,83	40,45	73,401
11,96	40,638	78,443329
16,932	42,51	79,091010
23,13	45,517	85,564
23,365	45,91	86,301
24,966	47,244	86,471
25,162	47,39	87,323
26,595	47,468	87,469
26,660	47,687	89,772
27,970755	48,19	115,32
28,054	48,366	118,59104
28,270	48,676	120,08
28,295	48,765	220,280
28,356	49,06	350,20
28,451		

Активная среда D_2O. *Условия возбуждения: импульсный разряд в парах* D_2O *при* $P = 27 \div 130$ Па; *некоторые линии возбуждаются также непрерывно; оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

26,36	56,830	103,33
33,896	61,182	**107,72019**
35,081	71,944	107,91
36,096	72,427	108,88
36,324	**72,747780**	110,49
36,526	73,337	111,74
37,788	74,341	170,08
37,864	74,526	171,67
39,53	76,305	239
40,994	78,16	263
41,79	83,730	276
48,80	84,111	358,5
50,71	**84,278897**	385
54,73	99,00	

Активная среда SO_2. *Условия возбуждения: импульсный разряд в смеси* SO_2 (50 Па) *и* He (500 Па); *некоторые линии возбуждаются также непрерывно; в режиме газодинамического лазера* (3,76 и 4,96 мкм) [6]

$\lambda_{вак}$, мкм

3,76	**141,06**	151,35
4,96	142,00	192,80
139,83	149,94	206,53
140,82	151,08	215,27

Активная среда H_2S. *Условия возбуждения: импульсный разряд в* H_2S *при* $P = 20$ Па; *в режиме газодинамического лазера* (6,58 и 6,63 мкм) [6]

$\lambda_{вак}$, мкм

6,58	52,307	73,54
6,63	55,612	81,45
33,30	60,224	83,45
37,6000	**61,413**	**87,580**
48,70	62,6	92,0

96,4	126,2	140,8
103,3	129,1	162,4
108,8	130,60	192,9
116,8	135,3	**225,3**

Активная среда D_2S [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

9,19
9,31

Активная среда BF_2 [6]. *Условия возбуждения: в режиме газодинамического лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

11,92
26,35

Активная среда BCl_3. *Условия возбуждения: непрерывный режим при добавлении паров* BCl_3 *к газовой смеси* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм

18,3	19,4	22,4
18,8	20,2	23,0
19,1	20,6	

Активная среда SF_6. *Условия возбуждения: импульсное возбуждение при двухфотонном поглощении излучения* CO_2*-лазера* (10,6 мкм)

$\lambda_{возд}$, мкм

15,9005

Активная среда NH_3. *Условия возбуждения: импульсный разряд с высокой плотностью тока в* NH_3 *при* $P = 70 \div 130$ Па; *оптическая накачка лазерами на* N_2O, CO_2, HF

$\lambda_{возд}$, мкм

6,27	**12,316**	25,4744
6,69	12,348	25,8839
9,3	12,520	26,1046
9,6	**12,526**	26,4416
9,7	**12,541**	26,7068
9,9	12,566	27,8437
10,2	12,591	34,2248
10,5	**12,631**	35,1573
10,6	**12,689**	35,5011
10,7	**12,8115**	36,02
11,0	12,812	36,1686
11,446	**12,851**	49,0356
11,459	12,876	54,45
11,526	**12,921**	56,8631
11,5547	13,031	58,01
11,721	13,114	63,25
11,80	13,124	64,5
11,811	13,145	64,7274
11,994	13,176	67,19
12,010	13,269	67,24
12,078	13,218	72,6
12,0791	13,331	72,76
12,1143	13,411	74,15
12,1558	13,576	78,28
12,1846	13,7261	81,53
12,245	13,821	83,60
12,251	15,8782	83,85
12,266	15,9452	84,64
12,280	18,9250	87,1
12,286	19,5497	88,05

Продолжение табл. 34.2

88,20	151,5	290,4
88,90	155,17	290,9
90,50	155,28	291,2
90,93	216,44	291,35
92,87	223,91	291,95
112,98	225,39	301,2
114,29	225,07	306,28
119,02	256,61	311,75
147,04	263,43	388
147,2	280,5	404,89
147,15	281,35	
151,49	281.48	

Молекула $^{15}NH_3$

14,3	16,0	375,9
14,6	17,8	218,9
15,2	89,68	111,9
15,7		

Активная среда PH_3. *Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм

77,58	116,88	166,73
83,77	117,01	166,79
89,76	121,45	166,84
89,80	129,78	166,87
90,26	129,98	180,54
97,19	130,14	182
97,30	135,95	186,25
102,62	136,71	187,56
104,4	140,85	194,47
106,04	145,88	194,70
106,05	146,07	194,89
106,09	146,34	195,18
106,23	155,07	223,07
109,7	156,34	

Активная среда NOCl. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм

16,4	16,69	16,86
16,52	16,7	16,9
16,57	16,75	16,99

Активная среда CF_4. *Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм

15,33	15,74	16,12
15,41	15,76	16,18
15,49	15,77	16,20
15,50	15,84	16,24
15,55	15,85	16,26
15,56	15,91	16,27
15,58	15,94	16,31
15,60	16,00	16,35
15,61	16,03	16,40
15,62	16,07	16,85
15,70	16,10	

Продолжение табл. 34.2

Активная среда CF_3Br. *Условия возбуждения: оптическая накачка* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм

823,4
885,2

Активная среда CF_3I. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм

13,54
13,57
13,63

Активная среда C_2H_2. *Условия возбуждения: импульсное возбуждение смеси* C_2H_2, H_2 *и* He *с прокачкой рабочей среды; оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

8,0334	17,45	19,03
8,0340	17,61	19,13
8,0347	17,77	19,21
8,0356	18,67	19,27
8,0380	18,79	19,67
8,0409	18,85	20,01
8,0442	18,96	20,44

Активная среда C_2H_4. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм

10,53
10,98

Активная среда H_2CO. *Условия возбуждения: импульсный разряд при* $P = 7 \div 50$ Па; *оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

101,9	155,1	163,8
119,6	157,6	170,2
122,8	159,5	184,4
125,9		

HDCO

195
196

D_2CO

233	733,5739
245	752,6807
279	

Активная среда $(H_2CO)_3$. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

384	680	815
433	696	890
460	712	891
512	750	948,9247
619		

Активная среда HCOOH. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

229,39	336	401
254,80	336,3	403
278,61	342,74	404,1
302,08	359,81	405,5848
302,2781	368	405,75
309,23	388	406
311,45	392	413
319,48	393,6311	414
334,82	394,2	418,51
334,91	396	418,6

419,55	446,75	533,6773
420	446,8730	534,5
420,26	447	534,8
421	447,58	577
428	458,43	580,3872
432,1093	458,5229	580,52
432,6313	458,6	582
432,6325	460,51	669,5308
433,10	492	670
435	493,28	742,5723
437,7	496	743
438	512,88	744,0503
441	513,2	745
445,21	515,1690	761
445,81	518,83	785
445,8971	530	786,1617
446,5054		

HCOOD

462		
925		

DCOOD

305	492	790
349	526	937
381	569	

Активная среда CH_2F_2. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{возд}$, мкм

95,5	193,9	355,2
105,5	194,5	381,8
109,3	202,5	**382,9**
117,7	**214,5**	**394,7**
121,7	227,6	418,1
122,4	**230,1**	432,4
122,4	**235,7**	434,9
134,0	**236,5**	**464,5**
135,3	255,9	503,6
158,5	261,7	511,3
158,9	270,0	540,8
165,8	**272,2**	567,5
165,9	**287,7**	588,1
166,6	**289,4**	642,5
166,6	293,9	657,2
184,3	298,2	725,1
191,8	326,5	1448,1

Активная среда CH_2Cl_2. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера. Непрерывный режим генерации*

$\lambda_{вак}$, мкм

249	342	631
254	469	829
258	520	

Активная среда CH_3F. *Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; линии с* $\lambda \approx 496$ мкм *возбуждаются и в непрерывном режиме*

$\lambda_{вак}$, мкм

9,75	196,0	251,91
190,3	199,14	372,68
192,78	200,3	397,51
195,0	215,3	419

451,903	496,072	541,147
451,924	496,1009	595
494	541,113	1221,79

Активная среда CH_3Cl. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

227,15	275,09	397,6
236,25	281,67	461,20
240,98	286,79	511,90
250,4	307,65	568,81
254	333,96	870,80
261,03	349,34	943,97
271,29	354	958,25
273,7	364,5	968
275,00	378,57	1886,87

CD_3Cl

224	318	519,30
245	383,28	698,55
246	443,26	735,12
249	449,79	883,59
288	464,76	1239,47
288	480,31	1990,75
291,27		

Активная среда CH_3Br. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм

245,04	407,72	658,53
264,05	414,98	660,70
279,81	418,31	715,40
294,28	422,78	749,29
311,07	508,48	749,36
311,10	531,06	831,13
311,20	545,21	925,52
311,21	545,39	990,15
332,86	564,68	1310,38
333,15	585,72	1572,64
352,75	631,93	1965,34
380,02	632,00	

Активная среда CH_3I. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{вак}$, мкм

377,45	508,37	583,87
390,53	517,33	639,73
392,48	525,32	670,99
447,1424	529,28	719,30
457,25	542,99	964
459,18	576,17	1063,29
477,87	578,90	1253,738

CD_3I

272	569,4773	734,2624
301	599,5499	745
390	614,1098	788,48
433,1038	640	895
444,3862	644	918,6101
460,5619	660,5822	953,8799
487,2260	667,2322	981,7094
490,3909	670,0940	1005,3476
523,4061	670,1143	1099,5441
540	691,1292	1549,5048
556,8755	730,3234	

Активная среда CH_3OH. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{вак}$, мкм

37,5	164,5076	251,56
40,2	164,77	253,6
42,18	164,7832	254,1
43,4	170,57638	263,7
43,47	171,3	264,6
55,39	185,5	267,4432
58,1	186,03	278,8
60,25	190,3209	280,96
65,1	191,2	290,62
65,6	191,57	292,2
69,70	191,58	292,5
70,511716	191,63	293,78
73,30	193,2	301,9943
77,92	194,01	369,11368
80,3	198,8	386,20
80,6	202,4	390,1
85,59	205,3	392,06871
92,60	206,9	416,5224
92,69	209,89	417,8
96,522394	211,25	451,9
97,48	214,35	469,02330
117,95	218,22	470
118,83409	223,5	471
129,5497	232,85	486,1
133,1196	232,93906	570,56864
151,35	237,6	603,06
159,2	242,4727	614,92
162	242,79	627,34
163,03353	246	694,17
163,9	250,78129	695
164	251,13983	699,42258
164,3		

$^{13}CH_3OH$

85,31729	149,27226	268,57203
86,11179	152,07568	280,21826
103,48081	157,92848	280,23974
115,82324	203,63578	332,6033
118,01314	208,41205	338,9737
146,09739	238,52268	461,3848
148,59041		

CD_3OH

34,8	179	277
37,6	182,4	278
40,1	184	285
41,5	191,9	286,6
41,8	201	287,4
43,9	219,9	290,0
49,8	222	297
52,9	223	299
60,8	232	309
71,0	236	310
76,1	238,3	321
82,1	253,2	336
86,4	258,7	346
102,6	266	350
112,3	266,2	351
128,7	267	352
144,0	268	353
158	276	370

Продолжение табл. 34.2

385	483	695
386	495	702
398	498	703
407	508	711
409	517	722
410	551	745
412	553	760
419	554	774
421	583	862
422	599	968
435	646	1100
455	648	1146
472	680	1290
480	685	

CH_3OD

46,7	134	225
57	134,7	229,1
69,5	134,8	238
70,3	136	294,81097
100,8	145,66171	305,72610
104	212,8	330,1
110	215,37244	417,1
117		

CD_3OD

35	184	312
41	229	354
78	255	406
119	312	414
150	339	495
165	299	869

CH_2DOH

109	238	322
125	250	364
151	272	374
164	295	396
167	296	468
171	308	616
207		

CHD_2OH

165	260	426
168	346	483
179	355	513
238	363	

Активная среда CH_3CN. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{вак}$, мкм

281,18	427,04	704,53
281,96	430,55	713,72
286,88	441,15	741,62
303,54	453,41	854,41
346,32	466,25	1014,89
372,87	480,01	1016,33
380,71	494,74	1086,89
386,41	510,16	1146,83
387,31	561,41	1351,78
388,39	652,68	1814,37
422,14		

Активная среда CH_3NC. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{возд}$, мкм
280
288
404

Активная среда CH_3CCH. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм		
427,89	563,13	675,29
428,87	566,04	757,41
488,88	583,77	798,55
516,77	647,89	1097,11
531,08	649,59	1174,87

Активная среда CH_3NH_2. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм		
99,5	159	201
104	164	208
115,5	166	218
118	168	219
126	176	243
134	175	251
139	177	267
141	180	268
143	183	288
147	194	314
148,5	198	347
153		

Активная среда CH_2CF_2. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм		
288,5	532	884
375,0	554,4	890,0
415	568	890,1
458	663,3	990
464,3	764,1	1020

Активная среда $C_2H_6O_2$. *Условия воздуждения: импульсная оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм		
62,5	132	250
69,1	135	252
70,1	164	262
75,2	169	277
77,4	171	288
90,8	185	290
95,8	189	299
109,1	192	344
117,1	197	358
118	200	388
118,9	231	415
125,8	240	696

Активная среда CH_3CH_2F. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{вак}$, мкм		
206,6	376	519
217,1	378	540,9
226,9	404	593,32
264,7	405	620,4
282,3	405,50	851,9
330,2	462,92	1013
336,7	486	1069
362,1	502,2	1546

Активная среда CH_3CHF_2. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{вак}$, мкм	
458	533
464	755

Активная среда CH_3CF_3. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{вак}$, мкм
379

Активная среда C_2H_5Cl. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{вак}$, мкм	
900	1400
1350	1720

Активная среда C_2H_5OH. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{вак}$, мкм
396

Активная среда C_2H_3Cl. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{вак}$, мкм		
368	532	699
424	538	707
445	574	828
487	603	935
507,7	634,4	995
519	638	1041

Активная среда C_2H_3Br. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{возд}$, мкм		
283	528,49	784,26
356	553,69	826,94
370	594,72	853,43
396	618,44	900,13
411	624,09	943,22
416	635,35	936,15
419	646	**963,48**
424	**649,42**	985,85
427	**680,54**	989,19
438,5	693,13	990,63
443,5	707,22	1247,59
445	712	1383,88
482,96	724,13	1394,06
490,08	741,11	1614,88
506	780,13	1899,889

Продолжение табл. 34.2

Активная среда C_2H_3CN. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{возд}$, мкм		
270,6	586	793
489	623	828
503	631	910
550	722	940
574,4	738	1156
578	775	1184
584		

Активная среда CH_3OCH_3. *Условия возбуждения: импульсная оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера*

$\lambda_{возд}$, мкм		
375	480	495
462	492	520

Активная среда C_3H_2O. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{возд}$, мкм	
148	336
156	516

Активная среда ClO_2. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{возд}$, мкм	
112	204
176	216
196	

Активная среда HCCF. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{возд}$, мкм
509
1028

Активная среда FCN. *Условия возбуждения: оптическая накачка излучением* CO_2*-лазера; непрерывный режим генерации*

$\lambda_{возд}$, мкм
308

34.3. ЛАЗЕРЫ НА ПРИМЕСНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Активным веществом лазеров на примесных кристаллах служат ионы элементов переходных групп, внедренные в кристаллическую матрицу. Возбуждение ионов-активаторов осуществляется оптически, чаще всего с помощью газоразрядных импульсных ламп или ламп непрерывного действия. Энергетические уровни ионов-активаторов отличаются от уровней свободных ионов из-за взаимодействия с кристаллической матрицей, которое приводит к расщеплению и уширению электронных уровней иона, а также к образованию у них в ряде случаев колебательной структуры (рис. 34.10, 34.11). Наибольшее воздействие испытывают уровни, соответствующие внешним электронам ионов, так как внутренние электроны экранируются внешними оболочками.

Подавляющее число лазеров на примесных кристаллах генерирует излучение на чисто электронных переходах. Интерес к лазерам на электронно-колебательных переходах (рис. 34.11) связан в основном с возможностью перестройки длины волны излучения.

Одни и те же ионы-активаторы в зависимости от типа кристалла, в который они внедрены, образуют системы с различными генерационными параметрами. Большое влияние при этом оказывает температура активной среды, в зависимости от которой меняются радиационные параметры и спектр поглощения ионов-активаторов в кристалле.

Как правило, кристаллы до внедрения в них ионов-активаторов прозрачны на длине волны накачки, однако в ряде случаев в кристалл кроме ионов-активаторов вводятся также ионы-сенсибилизаторы, роль которых сводится к поглощению энергии накачки и передаче ее лазерному иону, что повышает эффективность лазера.

Из большого числа (более 270) существующих диэлектрических лазерных кристаллов наибольшее распространение получили кристаллы $Y_3Al_3O_{12}$ (ИАГ — иттрий-алюминиевый гранат), $YAlO_3$ (перовскит) с примесью ионов Nd^{3+}, а также Al_2O_3—Cr^{3+} (рубин). Замечательной особенностью этих соединений является удачное сочетание удовлетворительных спектрально-генерационных свойств с рядом таких необходимых качеств, как высокая механическая прочность, твердость, значительная теплопроводность и прозрачность в широком спектральном интервале. Повышение эффективности кристаллических лазеров на ионах Nd^{3+} по сравнению с лазерами на ИАГ достигнуто за счет сенсибилизации лазерного кристалла ионами Cr^{3+}, обладающими широкими полосами поглощения в видимой области. Передача возбуждения от ионов Cr^{3+} на верхний лазерный уровень Nd^{3+} (рис. 34.10) происходит путем широкополосной люминесценции, связанной с электронно-колебательным переходом $^4T_2$—$^4A_2$ (рис. 34.11).

Эффективность передачи возбуждения из низколежащего возбужденного состояния Cr^{3+} ^2E на $^4T_2$ определяется энергетическим зазором между этими состояниями, который сильно зависит от вида кристаллического поля. Это позволяет получить высокую эффективность передачи возбуждения от ионов Cr^{3+} к ионам Nd^{3+} в кристалле гадолиний-скандий-галлиевого граната (ГСГГ) и, в конечном счете, достичь КПД лазера на ГСГГ — Nd^{3+} 4,5%, что в 2,4 раза выше КПД лазера на ИАГ — Nd^{3+} в аналогичных условиях [11].

На электронно-колебательном переходе хрома $^4T_2$—$^4A_2$ осуществлены также перестраиваемые по длине волны кристаллические лазеры, работающие при T=20°C. Такие лазеры созданы на основе кристаллов александрита ($BeAl_2O_4$) [12], а также на основе уже упоминавшихся кристаллов ГСГГ [13]. Диапазон перестройки составляет 730—800 нм для александрита и 766—820 нм для ГСГГ при полном КПД 2%.

В табл. 34.3 представлены длины волн и рабочие температуры генерации лазерных диэлектрических кристаллических систем. Лазерные системы разделены по активаторным (лазерным) ионам. Кристаллические матрицы перечисляются в алфавитном порядке. Если в кристалл добавляется сенсибилизатор, то обозначение соответствующего иона и его концентрация указываются в первой колонке через двоеточие при условии, что концентрация сенсибилизатора близка к содержанию активатора. Иногда сенсибилизирующее действие оказывают ионы, входящие в структуру самой матрицы-основы. Например, формула кристалла $LiYF_4$, содержащего примерно равные доли Y и Er, в таблице записана

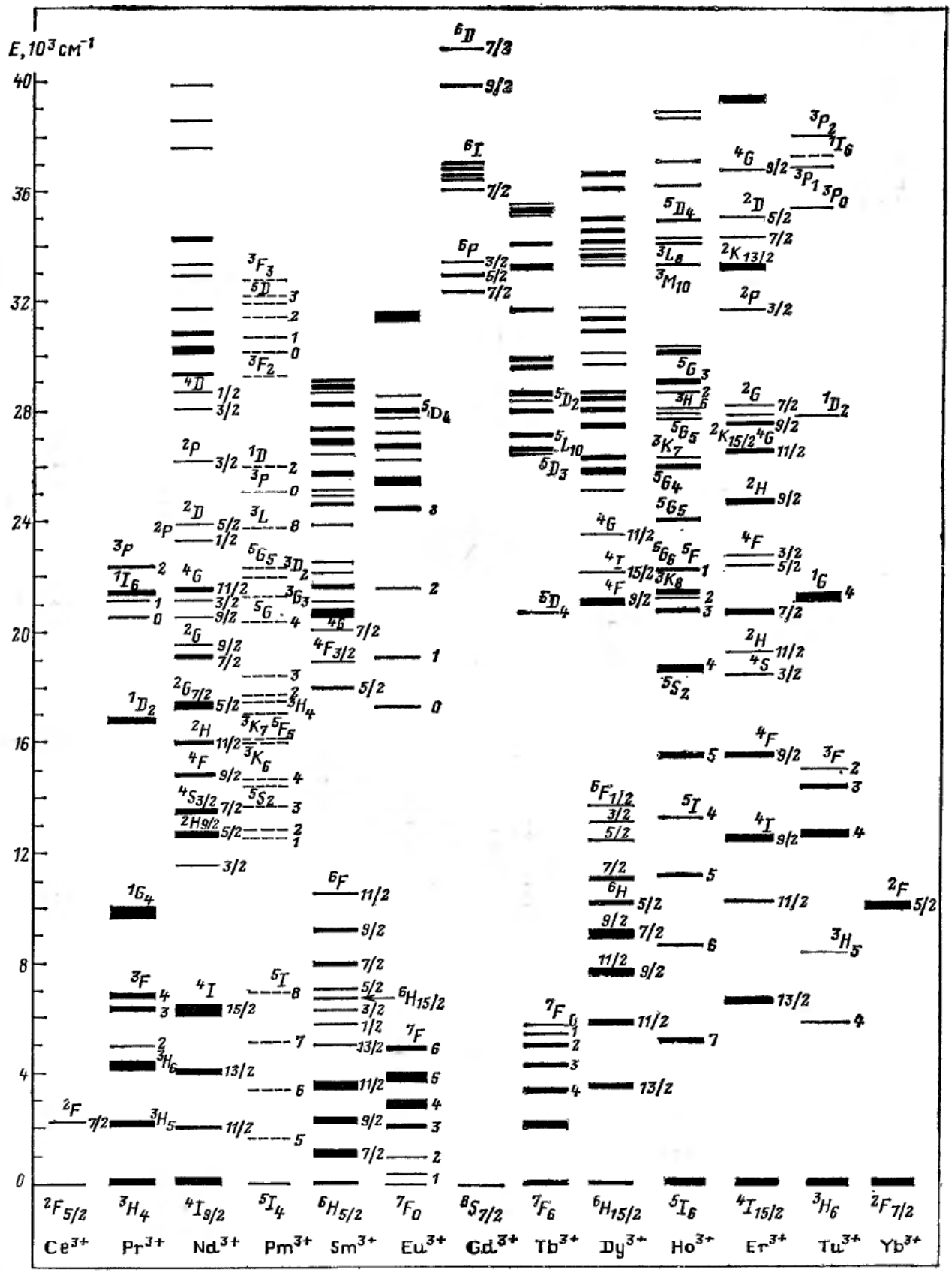


Рис. 34.10. Энергетические состояния редкоземельных (TR^{3+}) ионов в кристаллах [10]

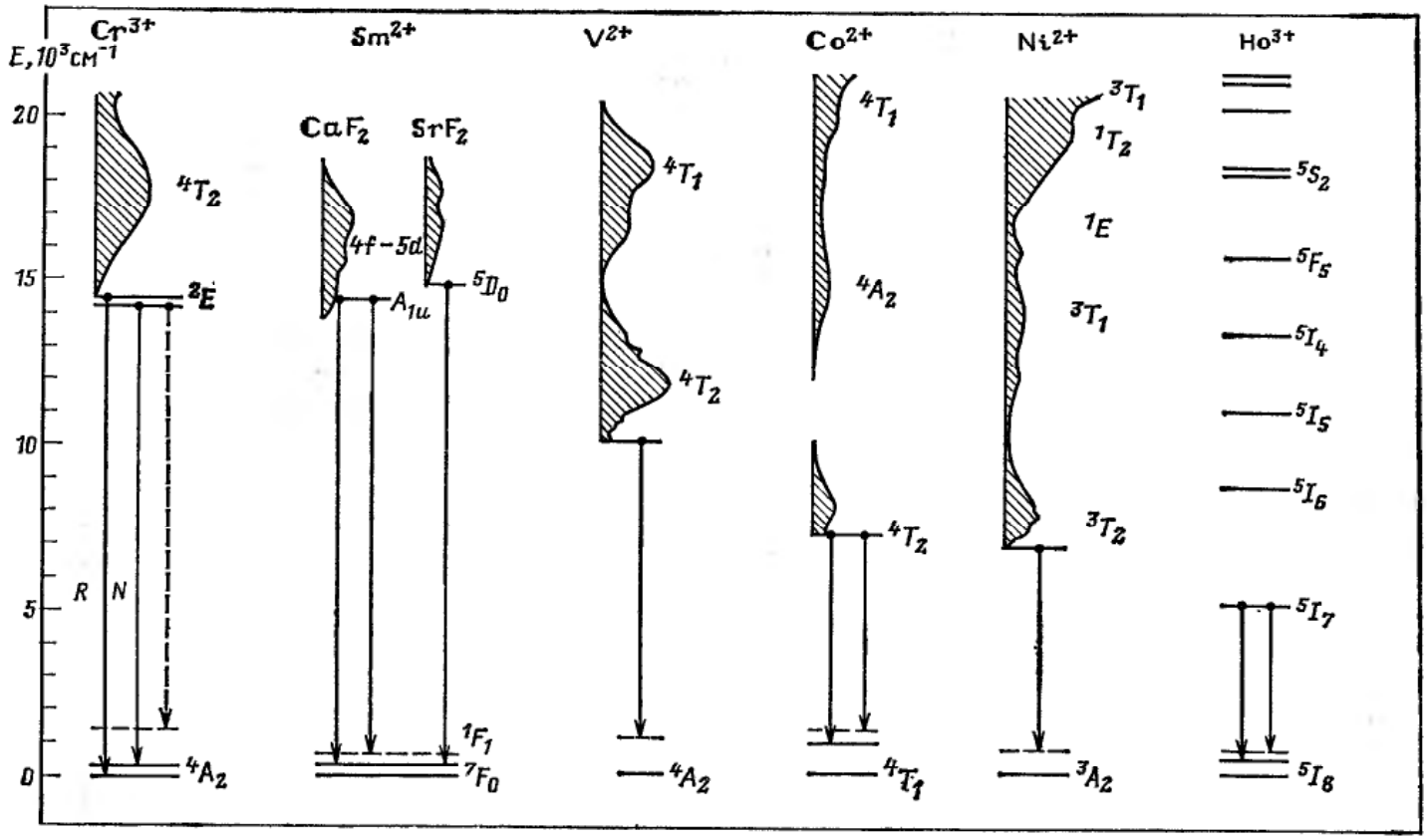


Рис. 34.11. Упрощенные рабочие схемы кристаллических лазеров, генерирующих на электронных и электронно-колебательных переходах [10]

так: Li(Y, Er) F_4. Возможен также более сложный случай, например Li(Y, Er) F_4: Tu^{3+}. Здесь содержание ионов Tu^{3+} (второго сенсибилизатора) невелико и приблизительно соответствует концентрации активаторных ионов. Может быть указано как массовое, так и атомное содержание сенсибилизирующей примеси, причем указанное значение может относиться как к исходной шихте, так и к кристаллу. Для уточнения следует обратиться к оригинальным работам.

Более подробные сведения о лазерах на диэлектрических кристаллах, а также о физических и механических свойствах лазерных кристаллических матриц можно найти в монографии [14], а также в обзорах [10, 12].

Таблица 34.3. **Длины волн генерации лазерных диэлектрических кристаллических систем [10]**

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
	Группа железа		
	Хром (Cr^{3+}, $3d^3$)		
Al_2O_3	$^2E\ (\bar{E}) \rightarrow {}^4A_2$	0,6943 (R_1) 0,6934	300 77
	$^2E\ (2\bar{A}) \rightarrow {}^4A_2$	0,6929 (R_2)	290
$BeAl_2O_4$	$^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ [12]	0,73—0,8	300
$Gd_3Sc_2Ga_3O_{12}$	$^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ [13]	0,766—0,82	300
Cr^{52}	$^2E\ (\bar{E}) \rightarrow {}^4A_2$	0,6934089 0,6934255	~70 ~70
Cr^{50}	$(Cr^{3+} \rightarrow Cr^{3+})$*1	0,7009 (N_2) 0,7041 (N_1)	77 77
$Y_3Al_5O_{12}$	$^2E\ (\bar{E}) \rightarrow {}^4A_2$	0,6874	300

*1 Генерация связана с парными центрами.

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
	Ванадий (V^{2+}, $3d^3$)		
MgF_2	$^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$	1,1213	77
	Железо (Fe^{2+}, $3d^5$)		
n-InP	$^5T_2 \rightarrow {}^5E$ [15]	3,53	2
	Кобальт (Co^{2+}, $3d^7$)		
$KMgF_3$	$^4T_2 \rightarrow {}^4T_1$	1,821	77
$KZnF_3$ [16]	$^4T_2 \rightarrow {}^4T_1$	1,65—2,07	80—200
MgF_2	$^4T_2 \rightarrow {}^4T_1$	1,750	77
		1,8035	77
		1,99	77
		2,05	77
ZnF_2	$^4T_2 \rightarrow {}^4T_1$	2,165	77
	Никель (Ni^{2+}, $3d^8$)		
$KMgF_3$	— [17]	1,591	77
MgF_2	$^3T_2 \rightarrow {}^3A_2$	1,623	77
		1,636	77
		1,674—1,676	85
		1,731—1,756	85
		1,785—1,797	198—240
MgO	$^3T_2 \rightarrow {}^3A_2$	1,3144	77
MnF_2	$^3T_2 \rightarrow {}^3A_2$	1,915	77
		1,922	77
		1,865	20
		1,929	85
		1,939	85
Двухвалентные ионы редкоземельных элементов			
	Самарий (Sm^{2+}, $4f^6$)		
CaF_2	$5d \rightarrow {}^7F_1$	0,7085	20
		0,708	65—90
		0,720	>65
		0,729	>65
SrF_2	$^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$	0,6969	4,2
	Диспрозий (Dy^{2+}, $4f^{10}$)		
CaF_2	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,36	77
		2,35867	77
SrF_2	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,3659	77
	Тулий (Tu^{2+}, $4f^{13}$)		
CaF_2	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,116	27
Трехвалентные ионы редкоземельных элементов			
	Церий (Ce^{3+}, $4f^1$)		
LaF_3	$5d \rightarrow 4f$ [18]	~0,285	—
YLF	$5d \rightarrow 4f$ [19]	0,309—0,325	—

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
	Празеодим (Pr^{3+}, $4f^2$)		
$Ca(NbO_3)_2$	$^1G_4 \rightarrow {}^3H_4$	1,04	77
$CaWO_4$	$^1G_4 \rightarrow {}^3H_4$	1,0468	20—90
$LaBr_3$	$^3P_1 \rightarrow {}^3H_5$	0,532	—
	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$	0,621	—
	$^3P_2 \rightarrow {}^3F_3$	0,632	—
	$^3P_0 \rightarrow {}^3F_2$	0,647	—
LaF_3	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$	0,5985	77
$LaCl_3$	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_4$	0,4892	5,5—14
	$^3P_1 \rightarrow {}^3H_5$	0,5298	35
	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$	0,6164	65
		0,619	—
	$^3P_0 \rightarrow {}^3F_2$	0,6452	300
$LiYF_4$	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_4$	0,479	300
	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_5$ [20]	0,5378	110
	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$ [20]	0,6071	110
	$^3P_0 \rightarrow {}^3F_2$	0,6395 [21]	300
	$^3P_0 \rightarrow {}^3F_3$	0,6954 [20]	110
	$^3P_0 \rightarrow {}^3F_4$	0,7190 [20]	110
$PrBr_3$	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$	0,622	—
	$^3P_0 \rightarrow {}^3F_2$	0,649	300
$PrCl_3$	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_4$	0,489	5,5—14
	$^3P_1 \rightarrow {}^3H_5$	0,531	12
		0,617	65
	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$	0,620	—
	$^3P_0 \rightarrow {}^3F_2$	0,647	300
PrF_3	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$ [22]	0,5980	16
$SrMoO_4$	$^1G_4 \rightarrow {}^3H_4$	1,04	—
$YAlO_3$	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$ [23]	0,6139	110—250
	$^3P_0 \rightarrow {}^3F_3$ [23]	0,7195	110—250
	Неодим (Nd^{3+}, $4f^3$)		
$Ba_{0,75}Ca_{0,25}Nb_2O_6$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,062	295
BaF_2	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,060	77
$BaF_2 — LaF_3$	$^4F_{3,2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,534	300
		1,0538	77
		1,0580	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,054	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3185	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3280	300
		1,3290	77
$BaF_2 — CeF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,054	300
$BaF_2 — GF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0526	300
$BaF_2 — YF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0521	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,32	300
$Ba_2MgGe_2O_7$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0544	300

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
$Ba_{0,25}Mg_{2,75}Y_2Ge_3O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0615	300
$Ba_2NaNb_5O_{15}$ ($\parallel c$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0613	300
$Ba_2ZnGe_2O_7$ ($\parallel c$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0544	300
$Bi_4Ge_3O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,06425	77
		1,0644	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3418	300
$CaAl_4O_7$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0786	300
		1,05895	77
		1,06585	—
		1,07655	77
		1,0772	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3420	300
		1,3710	—
		1,3400	77
		1,3675	—
$CaAl_{12}O_{19}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0497	300
CaF_2	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0457	77
CaF_2 (I)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0461	300
		1,0457	50
		1,0467	—
		1,0448	50
		1,0508	—
		1,0650	50
		1,0481	—
		1,0448	120
		1,0661	—
CaF_2 (II)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0885	300
$CaF_2 - CeF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0654	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3185	300
$CaF_2 - GdF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0654	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3185	300
$CaF_2 - CeO_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0885	300
$CaF_2 - LaF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0645	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3190	300
$CaF_2 - SrF_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0369	300
$CaF_2 - SrF_2 - BaF_2 - YF_3 - LaF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0535	300
$CaF_2 - YF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0461	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0540	300
		1,0632	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3255	77
		1,3380	—
		1,3600	77

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
		1,3270	300
		1,3370	300
		1,3585	—
$CaF_2 — YF_3 — NdF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0632	300
$Ca_4La\,(PO_4)_3O$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0613	300
$CaLa_4\,(SiO_4)_3\,O$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0610	300
$CaGd_4\,(SiO_4)_3\,O$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	~1,06	300
$Ca\,(NbO_3)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,06	77
		1,0612	—
		1,0615	300
$CaMoO_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,061	300
		1,067	—
$Ca\,(PO_4)_3\,F$ ($\parallel a$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0630	300
$Ca\,(PO_4)_3\,F$ ($\parallel c$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3347	300
		1,3345	77
$Ca\,(NbO_3)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow 4I_{13/2}$	1,3380	300
		1,3425	—
$CaSc_2O_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^3I_{11/2}$	1,0720	300
		1,0755	—
		1,0868	300
		1,0730	77
		1,0867	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3565	300
		1,3870	77
$Ca_3\,(VO_4)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,067	300
$CaWO_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,9145	77
$CaWO_4\,(Na^+)$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0582	300
		1,0652	—
		1,0649	77
$CaWO_4\,(Nb^{5+})$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0587	77
		1,0601	—
		1,0649	77
		1,0650	—
		1,0634	77
$CaWO_4$ ($\parallel c$, Na^+)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3340	300
		1,3475	—
		1,3310	300
		1,3459	—
$CaWO_4$ ($\perp c$, Na^+)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3370	300
		1,3390	—
		1,3345	77
		1,3372	—
		1,3459	77
		1,3880	—

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
$Ca_2Y_5F_{19}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0498	300
	$^4F_{3\,2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3200	77
		1,3190	300
		1,3525	—
$CaY_2Mg_2Ge_3O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,05896	300
$CaY_4(SiO_4)_3O$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0672	300
$CdF_3 - CaF_2$ [24]	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0495	300
$CdF_2 - YF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0651	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3245	300
$CeCl_3$ ($\parallel a$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0647	300
CeF_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0410	77
		1,0638	90
		1,0404	300
		1,0639	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3320	300
		1,3240	77
		1,3310	77
		1,3675	—
CeP_5O_{14}	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,051	300
$GdAlO_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0760	300
$GdCa_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0621	300
		1,0584	77
		1,0599	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3307	—
		1,3315	—
$Gd(MoO_4)_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	~1,06	135
		1,0701	300
		1,0606	—
GdO_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0789	300
		1,0741	—
		1,0789	77
		1,0776	—
GdP_5O_{14}	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,051	300
$GdScO_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,08515	300
$Gd_3Sc_2Al_3O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,05995	300
		1,05915	77
		1,0520	300
		1,0660	—
$HfO_2 - Y_2O_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0604	300
$K_5Bi(MoO_4)_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0660	300
$KGd(WO_4)_2$ ($\parallel$ [010])	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0672	300
$KLa(MoO_4)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0585	77
		1,0587	300

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
$KLu(WO_4)_2$ [25]	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0714	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3482	300
$KY(MoO_4)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0669	300
$KY(MoO_4)_2$ ($\parallel a$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3485	300
$KY(WO_4)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,9137	77
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0688	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3525	300
		1,3545	—
		1,3515	77
$K_5NdLi_2F_{10}$ [26]	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,048	77
		1,052	300
$KNdP_4O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,052	300
$K_3Nd(PO_4)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,06	300
$K_3(NdLa)(PO_4)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,06	300
$K_5Nd(MoO_4)_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0660	300
$LaAlO_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0804	300
$La_2Be_2O_5$ ($\parallel b$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0698	300
$La_2Be_2O_5$ ($\parallel X$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,079	300
$La_2Be_2O_5$ ($\parallel b$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3510	300
LaF_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0407	300
		1,0633	—
		1,0403	77
LaF_3 ($\widehat{cF} \approx 20°$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3675	300
		1,3235	77
		1,3670	—
LaF_3 ($\widehat{cF} \approx 73°$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3310	300
		1,3125	77
		1,3305	—
$LaF_3 - SrF_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0486	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,0635	—
		1,3315	300
$La_3Ga_5SiO_{14}$ [27]	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0640	300
		1,0670	—
		1,0675	77
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3730	300
$LaNbO_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0624	300
La_2O_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,079	77
La_2O_2S	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,075	300
$LaMgAl_{11}O_{19}$ [28]	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0552	300
		1,0817	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3760	300
$LiGd(MoO_4)_2$ ($\parallel c$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0599	300

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
$LiLa(MoO_4)_2$ ($\parallel c$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0585	300
		1,0658	77
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3370	300
		1,3375	77
$LiNbO_3$ ($\perp c$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0846	300
$LiNbO_3$ ($\parallel c$)		1,0933	300
$LiNbO_3$ ($\parallel c$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3870	300
$LiNbO_3$ ($\perp c$)		1,3745	300
$LiNdP_4O_{12}$ ($\parallel a$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0477	300
$LiNdP_4O_{12}$ ($\parallel c$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0477	300
Li (Nd, La) P_4O_{12}	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0477	300
Li (Nd, Gd) P_4O_{12}	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0530	300
$LiYF_4$		1,047	—
$LuAlO_3$ ($\parallel [112]$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0671	77
		1,0831	120
		1,0675	300
		1,0759	300
		1,0832	—
$Lu_3Al_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3437	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,9473	77
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,06425	300
		1,0605	77
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3382	300
		1,3532	—
$LuScO_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,3525	77
$Lu_3Ga_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0785	300
		1,0609	300
		1,0623	300
		1,0587	77
		1,06025	—
		1,0616	77
$Lu_3Sc_2Al_3O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3315	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0599	300
		1,0591	77
α-$NaCaCeF_6$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3360	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0653	300
α-$NaCaYF_6$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3190	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0539	300
		1,069	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3285	300
		1,3375	—
		1,3600	300

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
$5NaF \cdot 9YF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0506	300
		1,0595	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3070	300
$Na_{0,5}Gd_{0,5}WO_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,06	77
$NaGdGeO_4$ [29]	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0615	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3334	300
$NaLa(MoO_4)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0595	300
		1,0653	—
$NaLa(MoO_4)_2$ ($\widehat{cF} = 60°$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3380	300
		1,3440	300
		1,3380	77
		1,3430	—
$NaLa(WO_4)_2$ ($\parallel c$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0635	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3355	300
$NaNdP_4O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,051	300
$Na_3Nd(PO_4)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,05	300
$Na_2Nd_2Pb_6(PO_4)_6Cl_2$ [30]	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0585	—
		1,0685	—
$Na_5Nd(WO_4)_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,063	300
$NdAl_3(BO_3)_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0635	300
$Nd_xGd_{1-x}(Al_{1-y}Cr_y)_3(BO_3)_4$ [31]	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,063	—
(NdLa) P_5O_{14}	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0511	300
(NdSc) P_5O_{14}	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,051	300
(NdIn) P_5O_{14}	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,051	300
$Pb_5Ge_3O_{11}$ [32]	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0789	77
		1,0799	300
$PbMoO_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0586	295
$PbMoO_4$ ($\perp c$)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3340	300
		1,3320	77
$Pb_5(PO_4)_3F$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0551	300
$SrAl_4O_7$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0576	300
		1,0828	—
		1,0566	77
		1,0568	—
		1,0627	77
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3345	300
		1,3665	—
		1,3320	77
		1,3530	—
$SrAl_{12}O_{19}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0491	300
SrF_2	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,037	295
		1,0437	77
		1,044	—

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
$SrF_2 - CeF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0590	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3255	300
$SrF_2 - GdF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0528	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3260	300
		1,3250	77
$SrF_2 - CeF_3 - GdF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0589	300
$SrF_2 - LaF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0597	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3250	300
$SrF_2 - LuF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0556	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3200	300
$SrF_2 - YF_3$ (10%)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0567	300
$SrLa_4(SiO_4)_3$ O	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0586	300
$SrF_2 - YF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3225	300
		1,3300	—
		1,3320	77
$SrMoO_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0643	295
		1,0576	295
		1,0640	77
		1,0652	—
		1,059	77
		1,0627	—
		1,0611	77
$Sr_5(PO_4)_3$ F (‖ *a*)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0585	300
$Sr_2Y_5F_{19}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0493	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3190	300
$YAlO_3$ (‖ [112])	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0796	300
		1,0644	300
		1,06405	77
		1,07225	—
		1,0842	300
$YAlO_3$ (‖ *c*)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,0913	530
		1,3393	300
$YAlO_3$ (‖ *b*)		1,3413	—
		1,3391	77
		1,3514	—
$YAlO_3:Cr^{3+}$ (0,3%)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0645	295
		1,0725	300
		1,0795	—
		1,0909	300
		1,0989	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3391	300
		1,3411	—

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
$Y_3Al_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,891	300
		0,900	—
		0,939	300
		0,946	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0610	77
		1,0612	—
		1,0519	300
		1,0642	—
		1,0613	300
		1,0640	—
		1,0736	300
		1,1119	—
		1,1158	300
		1,1225	—
		1,0615	300
		1,0682	—
		1,0779	300
		1,06415	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3187	300
		1,3335	—
		1,319	300
		1,318	—
		1,338	300
		1,358	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,833	233
$Y_3Al_5O_{12} : Cr^{3+}$ (1%)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0612	77
		1,0641	300
$Y_3Ca_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0633	300
Y_2O_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,073	77
		1,078	77
$Y_2O_3 — ThO_2 — Nd_2O_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,074	300
$Y_3Ga_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0589	300
		1,0603	—
		1,06205	300
		1,0583	77
		1,05975	77
		1,0614	—
YP_5O_{14}	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0525	300
		1,0515	—
$(Y, Lu)_3 Al_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0642	300
		1,0608	77
		1,0636	77
		1,0726	—

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
$Y_3Sc_2Ga_3O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0575	77
		1,0583	300
		1,0615	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3585	300
$YScO_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0843	300
		1,0770	77
Y_2SiO_5	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0715	300
		1,0742	300
		1,0782	—
		1,0710	77
		1,0781	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3585	300
		1,3580	77
YVO_4	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,069	~90
		1,0641	300
		1,0664	—
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3415	77
		1,3425	300
$ZrO_2 — Y_2O_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0608	300
	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3320	300
	Самарий (Sm^{3+}, $4f^5$)		
TbF_3 [33]	$^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{7/2}$	0,5932	116
	Европий (Eu^{3+}, $4f^6$)		
Y_2O_3	$^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$	0,6113	220
YVO_4	$^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$	0,6193	90
	Тербий (Tb^{3+}, $4f^8$)		
$LiYF_4:Gd^{3+}$ (10%)	$^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$	0,5445	300
	Диспрозий (Dy^{3+}, $4f^9$)		
$Ba(Y_{1,26}Er_{0,7})F_8$	$^6H_{13/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$	3,022	77
	Гольмий (Ho^{3+}, $4f^{10}$)		
$Ba(Y, Yb)_2F_8$	$^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$	0,5515	77
$Ba(Y_{1,8}Ho_{0,2})F_8$	$^5F_5 \rightarrow {}^5I_5$	2,362	77
		2,375	77
		2,363	20
		2,377	—
$BaY_{1,64}Er_{0,03}Tm_{0,03}F_8$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,71	295
		2,065	77
		2,0746	77
		2,0866	—
		2,0555	20
		2,074	—
$BaYb_2F_8$ [34]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0895	300
$Bi_4Ge_3O_{12}$ [35]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,087	77

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
CaF_2	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,092	77
	$^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$	0,55122	77
CaF_2:ErF_3 (3%), YbF_3 (3%), TmF_3 (3%)	$^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$	2,1	77
$CaF_2 - ErF_3$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0600	77
$CaF_2 - YF_3$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0318	90
$CaF_2 - YF_3$: (Er^{3+}, Tm^{3+}, Yb^{3+})	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,05	100
		2,06	298
$CaMoO_4$: Er^{3+} (0,75%)	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0740	77
		0,0707	77
		2,0556	—
$Ca(NbO_3)_2$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,047	77
$Ca(PO_4)_3F$: Cr^{3+} (0,3%)	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,079	77
$CaWO_4$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,046	77
$CaY_4(SiO_4)_3O$: Er^{3+} (37,5%) Tm^{3+} (3,75%)	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,059	77
$Cd_3Ga_3O_{12}$ [36]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,060	77
	$^5I_6 \rightarrow {}^5I_8$	1,2085	110
$ErAlO_3$	$^5S_2 \rightarrow {}^5I_5$	1,4040	110
(Er, Lu) AlO_3	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,1205	77
$Er_3Al_5O_{12}$ [34]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0010	77
Er_2O_3	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0985	77
$Er_3Sc_2Al_3O_{12}$: Tm^{3+}	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,121	145
Er_2SiO_5	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0985	110
(Er, Tm, Yb)$_3$ Al_5O_{12}	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,085	77
$Er_{1,5}Y_{1,5}Al_5O_{12}$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,1010	77
		2,0979	77
		2,0917	—
$GdAlO_3$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	~2,123	77
$Ho_3Al_5O_{12}$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	1,9925	90
		2,1294	90
		2,1224	77
HoF_3	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,097	—
$Ho_3Ga_5O_{12}$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,090	77
		2,1135	77
(Ho, Lu)$_3$ Al_5O_{12} [37]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,086	77
		2,1005	110
		2,1250	—
$Ho_3Sc_2Al_3O_{12}$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,1300	110
		2,1170	77
		2,1285	—
$KGd(WO_4)_2$]37]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0740	110
$KGd(WO_4)_2$ [36]	$^5S_2 \rightarrow {}^5I_5$	1,3982	110
$KGd(WO_4)_2$ ($\parallel b$)	$^5I_6 \rightarrow {}^5I_7$	2,9342	300
$KY(WO_4)_2$ [36]	$^5S_2 \rightarrow {}^5I_5$	1,3908	110
[37]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0765	110
$KY(WO_4)_2$: Er^{3+}, Tm^{3+}	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_7$	2,0720	~300
$KLu(WO_4)_2$ [37]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0790	110
$LaNbO_4$ [37]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0725	110
$LaNbO_4$: Er^{3+}	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,07	90
$LiHoF_4$	$^5F_5 \rightarrow {}^5I_7$	0,979	90
$LiNbO_3$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0786	77
$LiYF_4$	$^5S_2 \rightarrow {}^5I_7$	0,7498	90
	$^5F_5 \rightarrow {}^5I_7$	0,9794	90
	$^5S_2 \rightarrow {}^5I_6$	1,0143	90
	$^5S_2 \rightarrow {}^5I_5$	1,3960	300
	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0672	90
$LuAlO_3$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,1348	90
$Lu_3Al_5O_{12}$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,1020	77
$Lu_3Al_5O_{12}$: Cr^{3+} [38]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,1020	110
$Lu_3Al_5O_{12}$: Er^{3+} (2%), Tm^{3+} (2%)	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,1020	77
$Lu_3Al_5O_{12}$	$^5I_6 \rightarrow {}^5I_7$	2,9460	300

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
α-$NaCaErF_6$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0345	150
		2,0312	77
		2,0377	—
$LiY_{0,5-x-y}Er_{0,5}Tm_xHo_yF_4$ [39]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,06	—
$NaLa(MoO_4)_2 : Er^{3+}$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,050	90
$YAlO_3$ [37]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,1185	110
		2,13	110
$YAlO_3$ ($\parallel$ [112])	$^5I_6 \rightarrow {}^5I_7$	2,9180	300
		2,0132	300
$Y_3Al_5O_{12}$	$^5I_6 \rightarrow {}^5I_7$	2,9403	300
	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0914	77
		2,0975	—
		2,1223	77
$Y_3Al_5O_{12} : Cr^{3+}$ (0,5%)		2,0975	77
		2,1223	—
$Y_3Al_5O_{12}: Er^{3+}$ (50%), Tm^{3+} (6,7%)		2,0982	77
		2,1227	—
		2,1288	295
		2,13	—
$Tm_3Al_5O_{12}$ [34]	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0995	—
$Y_3Fe_5O_{12}$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_5$	2,086	77
$Y_3Fe_5O_{12}: Er^{3+}$ (5%), Tm^{3+} (5%)	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_3$	2,089	77
		2,107	77
$Y_3Ga_5O_{12}$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,086	77
		2,114	—
$YVO_4: Er^{3+}$, Tm^{3+}	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0412	77
$ZrO_2 - Er_2O_3$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,115	77
	Эрбий (Er^{3+}, $4f^{11}$)		
BaY_2F_8	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,5540	77
	$^4H_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,5617	77
	$^4H_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,7037	77
$BaY_2F_8 : Yb^{3+}$ (37,5%)	$^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,6709	77
		0,6700	—
$BaEr_2F_8$ [40]	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,6455	110
		1,7355	—
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,2320	110
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,8425	110
		0,8543	—
	$^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,9975	110
	$^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,6700	110
	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,7417	110
		2,7595	—
		2,7980	110
$BaYb_2F_8$ [41]	$^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,9654	300
	$^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,26	300
$Bi_4Ge_3O_{12}$ [35]	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,853	77
	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,558	77
		1,664	—
$CaAl_4O_7$	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,5500	77
		1,5815	—

Продолжение табл. 34.3

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
CaF_2	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,617	77
		1,5298	4
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,8456	77
		0,8548	77
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,26	77
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,696	77
		1,715	—
$CaF_2 - ErF_3$ [42]	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,726	77
		2,7295	300
		2,7460	—
		2,7490	300
		2,7955	—
$CaF_2 - ErF_3$	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,7985	300
$CaF_2 - ErF_3 : TmF_3$ (0,5%)	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,7307	300
$CaF_2 - YF_3$	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,69	298
	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	0,8430	77
		1,5448	77
$Ca(NbO_3)_2$	$^4I_{13/2} - {}^4I_{15/2}$	1,5558	—
$CaWO_4$	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,61	77
$CdAlO_3$ [43]	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,612	77
$Er_3Al_5O_{12}$ [44]	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,6571	77
$Er_3Al_5O_{12}$	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,7762	110
$ErAlO_3$ [44]	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	2,9370	300
$(Er, Lu)_3 Al_5O_{12}$	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,6632	110
$Er_{1,5} Lu_{1,5} AlO_3$	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	2,9395	300
$KEr(WO_4)_2$ [45]	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,6631	110
$KGd(WO_4)_2$ ($\parallel c$)	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	2,8070	300
	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,7222	300
$KGd(WO_4)_2$ ($\parallel b$)		2,7990	—
$KGd(WO_4)_2$ ($\parallel c$)	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,7990	300
$KGd(WO_4)_2$ ($\parallel b$)	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,8468	300
$KGd(WO_4)_2$ ($\parallel c$)	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,8468	300
$KGd(WO_4)_2$ ($\parallel b$)	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,7155	300
$KLu_{1-x} Er_x (WO_4)_2$ [46]	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,7325	300
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,7383	300
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,85	300
LaF_3	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,8092	300
$LiErF_4$	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,6113	300
$LiErF_4$ [47]	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,732	90
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,7042	110
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,2288	110
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,8540	110

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
	$^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	2,0005	110
	$^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,8500	110
$LiYF_4$	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,8500	300
$LuAlO_3$ (‖ [112])	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,6675	90
$Lu_3Al_5O_{12}$	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,86325	77
		0,8632	300
	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,6525	77
		1,6630	—
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,7762	300
	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,9406	300
		2,8298	—
$Lu_3Al_5O_{12}$: Ho^{3+}, Tm^{3+}	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,6990	300
$SrF_2 - ErF_3$ [48]	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,7285	300
		2,7450	—
		2,7930	300
$YAlO_3$ (‖ [112])	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,84975	300
		0,8594	—
		0,84965	77
		0,85165	—
	$^4S_{3,2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,6632	300
	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,7309	300
$Y_3Al_5O_{12}$	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,86275	77
		0,86275	300
	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,632	300
	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,7757	300
	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,8302	300
		2,9364	—
$Y_3Al_5O_{12}$	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,6602	—
		1,6452	77
$Y_3Al_5O_{12}$:Yb^{3+} (5%)	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,6459	295
$Yb_3Al_5O_{12}$	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,6615	77
$Y_{1,5}Er_{1,5}Al_5O_{12}$ [49]	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,7760	110
$Y_{0,75}Er_{0,25}AlO_3$ [49]	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,6631	110
$(Y, Er)_3Al_5O_{12}$ (‖ [100])	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,8302	300
		2,9364	300
$ZrO_2 - Er_2O_3$ (12%)	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,62	77
	Тулий (Tm^{3+}, $4f^{12}$)		
$Bi_4Ge_3O_{12}$ [35]	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,850	77
$CaF_2 - ErF_3$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,894	77
		1,9	—
$CaMoO_4$:Er^{3+} (0,75%)	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,9115	77
		1,9060	—
$Ca(NbO_3)_2$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,91	77
$CaWO_4$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,911	77
		1,916	—

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
$ErAlO_3$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,872	77
(Er, Lu) AlO_3	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,8845	77
Er_2O_3	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,934	77
$Er_{1,5}Y_{1,5}Al_5O_{13}$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,880	77
		1,884	—
		2,014	85
$GdAlO_3$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,8529	77
$LiNbO_3$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,8532	77
$LiYF_4$ [50]	$^3F_4 \rightarrow {}^3H_5$	2,3030	77
	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,8890	77
		1,9090	—
$Lu_3Al_5O_{12}$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,8855	77
		2,0240	—
$Lu_3Al_5O_{12} : Cr^{3+}$ [38]	$^3F_4 \rightarrow {}^3H_5$	2,3425	110
α-$NaCaErF_6$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,8580	77
		1,8885	—
SrF_2	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,972	77
$YAlO_3 : Cr^{3+}$ (‖ [112])	$^3F_4 \rightarrow {}^3H_5$	2,274	300
$YAlO_3 : Cr^{3+}$ (0,75%)	$^3F_4 \rightarrow {}^3H_5$	2,318	300
		2,353	—
		2,354	300
		2,355	—
		2,274	300
		2,318	—
$YAlO_3 : Cr^{3+}$ (0,1%)	$^3F_4 \rightarrow {}^3H_5$	2,34	300
$YAlO_3 : Cr^{3+}$ (0,1%)	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,856	90
		1,883	—
		1,9335	90
$YAlO_3$ (30% Er^{3+})	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,861	77
$YAlO_3 : Cr^{3+}$ (0,1%)	$^3F_4 \rightarrow {}^3H_5$	2,348	300
		2,349	—
$Y_3Al_5O_{12}$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,8834	77
		2,0132	85
$YAl_5O_{12} : Cr^{3+}$ (0,5%)	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	2,0132	77
$YAlO_3 : Cr^{3+}$ (0,01%)	$^3F_4 \rightarrow {}^3H_5$	2,324	300
$(Yb, Er)_3Al_5O_{12}$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,8850	77
		2,0195	—
YVO_4	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	2,019	295
$ZrO_2 — Er_2O_3$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,896	77
	Иттербий (Yb^{3+}, $4f^{13}$)		
$Bi_4Ge_3O_{12}$ [35]	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,030	77
$CaF_2 : Nd^{3+}$ (1 — 2%)	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0336	~120

Кристалл	Лазерный переход	Длина волны генерации, мкм	Температура, К
$Gd_3Ca_5O_{12}$: Nd^{3+} (~ 2%)	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0232	77
$Gd_3Sc_2Al_3O_{12}$:Nd^{3+} (1,5%)	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0299	77
$Lu_3Al_5O_{12}$: Nd^{3+} (~ 1%)	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0294	77
		1,0297	175
$Lu_3Ga_5O_{12}$:Nd^{3+} (1,5%)	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0230	77
$Lu_3Sc_2Al_3O_{12}$:Nd^{3+} (1,5%)	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0299	77
$Y_3Al_5O_{12}$	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0296	77
		1,0293	—
$Y_3Al_5O_{12}$:Nd^{3+} (~ 0,8%)	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0297	200
$Y_3Al_5O_{12}$: Nd^{3+} (~ 0,8%) Cr^{3+} (0,5%)	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0298	210
$Y_3Ga_5O_{12}$: Nd^{3+} (1,5%)	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0233	77
$(Y, Yb)_3 Al_5O_{12}$	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0293	77
$(Yb, Lu)_3 Al_5O_{12}$	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0294	77
	Уран (U^{3+}, $5f^3$)		
BaF_2	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	2,556	20
CaF_2	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	2,613	300
		2,57	300
		2,51	77
		2,44	77
		2,24	77
SrF_2	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	2,407	90; 77; 20

34.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ НЕОДИМОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ СТЕКОЛ

Стекло, активированное неодимом, — наиболее распространенный и широко применяемый материал для твердотельных лазеров. Отечественная промышленность и зарубежные фирмы выпускают более 50 марок активированных неодимом стекол.

В табл. 34.4 и 34.5 приведены физико-химические, оптические и спектрально-люминесцентные характеристики промышленных неодимовых лазерных стекол, выпускаемых в СССР. Все отечественные стекла имеют силикатную или фосфатную основу. Стимулированное излучение связано с переходами между электронными уровнями активаторного иона Nd^{3+}. Приведенные в таблицах спектрально-люминесцентные характеристики относятся к переходу $^4F_{3/2} \longrightarrow {}^4I_{11/2}$.

Одной из наиболее трудно определяемых спектроскопических характеристик лазерных материалов является пиковое сечение генерационного перехода. Разные работы дают противоречивые значения этой величины. В табл. 34.5 приведены сечения переходов, измеренные лазерной методикой в аналогичных условиях [51].

Лазеры на неодимовых стеклах работают в импульсном режиме. Для накачки обычно используются импульсные ксеноновые газоразрядные лампы.

Более подробные сведения о неодимовых лазерных стеклах можно найти в [51—53].

Таблица 34.4. **Физико-химические свойства промышленных неодимовых лазерных стекол [51, 52]**

Марка стекла	Концентрация ионов Nd^{3+}, 10^{20} $см^{-3}$	Плотность, 10^3 кг/см^3	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент линейного расширения, 10^{-7} $К^{-1}$	Модуль Юнга, 10^{13} Па	Модуль сдвига, 10^{13} Па	Коэффициент Пуассона
Силикатные стекла								
КГСС 3	2,02	2,90	—	—	113	6,37	2,16	0,25
КГСС 5	3,96	2,93	—	—	110	6,42		0,25
КГСС 7	5,93	2,96	—	—	105	6,50	—	0,25
ЛГС 5	6,03	3,01	—	—	102	—	—	—
ЛГС 236	1,83	2,56	0,62	670	93	7,79	3,19	0,22
ГЛС 1	1,90	2,66	0,98	710	94	7,35	2,99	0,23
ГЛС 2	1,98	2,70	—	—	119	6,78	—	0,23
ГЛС 3	5,30	2,70	—	—	121	6,83	—	0,24
ГЛС 4	4,56	2,66	0,70	710	112	6,93	2,84	0,22
ГЛС 5	0,97	2,72	0,49	670	113	5,78	2,25	0,27
ГЛС 6	1,96	2,74	0,49	670	114	5,68	2,25	0,26
ГЛС 7	3,05	2,81	0,40	670	113	6,17	2,45	0,26
ГЛС 8	5,16	2,86	—	—	108	5,98	2,35	0,27
ГЛС 14	4,56	2,73	0,70	690	108	7,0	2,75	0,23
ЛГС 59	4,68	2,62	—	—	114	6,55	2,64	0,23
Фосфатное стекло								
ГЛС 21	1,38	3,49	0,40	570	106	5,33	2,06	0,29
ГЛС 22	2,0	3,51	0,40	570	106	5,58	2,19	0,28
ГЛС 23	3,6	3,52	—	—	—	5,58	—	0,28
ГЛС 24	5,7	3,52	—	—	—	5,58	—	0,28
ГЛС 25	2,33	3,35	0,41	670	111	5,12	—	—
ГЛС 26	3,30	3,40	0,41	670	102	5,12	—	—
ГЛС 27	12,7	3,40	0,44	570	94	5,34	—	0,29
ГЛС 32	2,0	3,38	0,50	—	103	5,42	—	0,28
ЛГС 40	2,75	2,50	—	—	156	5,06	2,0	0,26
ЛГС 41	3,06	2,67	—	—	112	—	—	—
ЛГС 54	2,01	2,81	—	—	170	4,76	1,86	0,28
ЛГС 55	1,90	2,66	0,77	840	127	5,82	2,30	0,26
ЛГС 56	1,93	2,70	0,56	880	128	6,61	2,65	0,25
ЛГСИ-1	1,33	3,38	0,42	670	106	5,39	2,10	0,29
ЛГСИ-2	2,33	3,39	0,42	670	111	5,12	1,98	0,31

Таблица 34.5. **Оптические и спектрально-люминесцентные характеристики промышленных неодимовых лазерных стекол [52, 53]**

Марка стекла	Показатель преломления ($\lambda = 1{,}06$ мкм)	Коэффициент дисперсии	Коэффициент Брюстера, 10^{-3} им·м/Н	Показатель поглощения ($\lambda = 1{,}06$ мкм), 10^{-3} см$^{-1}$	Длина волны максимума люминесценции ($^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11,2}$), мкм	Ширина полосы люминесценции ($^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$), нм	Время жизни метастабильного состояния, мкс	Сечение генерационного перехода ($^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$), 10^{-20} см^2
Силикатные стекла								
КГСС 3	1,533	57,5	2,4	3—5	1,058	—	570	2,1
КГСС 5	1,536	57.5	2,4	3—5	1,057	—	510	2,1
КГСС 7	1,542	57,2	2,4	3—5	1,057	—	390	2,1
ЛГС 5	1,543	55,7	—	3—5	—	—	370	2,0
ЛГС 236	1,567	43,9	2,9	2—3	1.059	—	350	2,9
ГЛС 1	1,523	57,9	2,7	1—3	1,058	35	440	2,4
ГЛС 2	1,518	—	2,8	2	—	29	460	2,2
ГЛС 3	1,518	—	2,8	2	—	—	360	2,5
ГЛС 4	1,516	57,8	—	1—3	1,058	—	480	2,0
ГЛС 5	1,533	52,4	2,2	1—3	1,057	—	570	1,6
ГЛС 6	1,538	52.2	2,3	1—3	1,057	35	500	1,6
ГЛС 7	1,542	51,2	2,2	1—3	1,057	35	410	2,1
ГЛС 8	1,548	50,6	2,2	1—3	1,057	—	290	2,1
ГЛС 14	1,525	56,9	2,4	2—5	1,057	—	420	2,0
ЛГС 59	1,529	52,0	—	1—2	1,057	—	440	2,0
Фосфатные стекла								
ГЛС 21	1,582	58,6	1,1	1—2	1,055	—	340	3,5
ГЛС 22	1.582	58,7	1,3	1—2	1,055	28,6	300	3.5
ГЛС 23	1,582	—	1,3	1—2	1,055	—	250	3,5
ГЛС 24	1,582	—	1,3	1—2	1,055	—	210	3,5
ГЛС 25	1,568	65,3	1,3	1—2	1,054	—	270	3,0
ГЛС 26	1,564	65,7	1.4	1—2	1,054	—	230	3,0
ГЛС 27	1,568	—	1,4	1—2	1,054	—	90	3.0
ГЛС 32	1,582	56,5	1,3	1—2	1,054	—	270	3,2
ЛГС 40	1,493	67,0	—	1—2	1,054	24,0	200	4,0
ЛГС 41	1,506	69,5	—	1—2	1,054	—	230	2,9
ЛГС 54	1.562	44,8	2,1	1—2	1,055	26,7	260	3,9
ЛГС 55	1,521	63,4	2,0	1—2	1,053	30,0	310	2,8
ЛГС 56	1,532	63.3	1,9	1—2	1,054	29,5	300	3,1
ЛГСИ-1	1,565	65.7	1,3	1—2	—	—	—	—
ЛГСИ-2	1,568	65,3	1,3	1—2	—	—	300	3,0

34.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В полупроводниковых лазерах, в отличие от лазеров на примесных кристаллах, активным веществом служит сама кристаллическая матрица полупроводника, а примеси лишь служат источником носителей заряда: электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. При создании с помощью накачки избыточного (по сравнению с равновесным) числа электронов и дырок возможно возвращение к состоянию равновесия посредством оптического межзонного перехода — фоторекомбинации. Вероятность фоторекомбинации велика лишь для прямозонных полупроводников, таких, у которых максимум энергии в валентной зоне и минимум энергии в зоне проводимости соответствуют одному и тому же значению квазиимпульса. По этой причине все полупроводники, на которых получена генерация, являются прямозонными. Перечислим важнейшие свойства полупроводниковых лазеров:

1) компактность, обусловленная большим коэффициентом усиления (10^4 см$^{-1}$);

2) большой КПД (до 40%);

3) широкий диапазон длин волн генерации (0,3—30 мкм) и возможность плавной перестройки длины волны генерации, обусловленная зависимостью ширины запрещенной зоны полупроводника от температуры, давления, магнитного поля и т. п.;

4) малая инерционность, позволяющая модулировать излучение изменением накачки с частотой до 10 ГГц.

Инверсия населенностей для перехода с энергией $\hbar\omega$ возникает при условии $\Delta F = F_c - F_v > \hbar\omega > E_g$, где F_c и F_v — квазиуровни Ферми для электронов и дырок соответственно; E_g — ширина запрещенной зоны. На практике часто энергия фотона меньше номинального значения ширины запрещенной зоны, что связано с появлением при сильном легировании примесных зон на краю запрещенной зоны.

Для создания инверсии в полупроводниках используют четыре типа возбуждения: инжекцию носителей заряда, электронную накачку, ударную ионизацию (лавинный пробой) и оптическую накачку. Наибольшую эффективность имеют два первых типа накачки, которые и получили самое широкое распространение.

В качестве резонаторов полупроводниковых лазеров обычно используют плоские резонаторы, образуемые параллельными гранями кристалла. Для получения более эффективной спектральной селекции применяются внешние резонаторы с соответствующими селектирующими элементами, а также резонаторы с распределенной обратной связью (РОС). В РОС-лазерах периодические возмущения, определяющие спектральную селекцию, вносятся по всей длине активной среды. Коэффициент отражения, обеспечиваемый периодической структурой, оказывается достаточным для возникновения генерации без дополнительных зеркал. Периодическое возмущение, внесенное лишь на конце активного слоя, воспроизводит эффект зеркала и носит название распределенного брэгговского рефлектора.

Литература обзорного характера и монографии, включающие описание свойств полупроводниковых лазеров, указаны в [54—59].

Материалы для полупроводниковых лазеров. В качестве активных сред полупроводниковых лазеров используются в подавляющем большинстве случаев бинарные полупроводниковые соединения или многокомпонентные твердые растворы на их основе, так как элементарные полупроводники не являются прямозонными. В табл. 34.6 представлены полупроводниковые материалы, используемые в качестве рабочего вещества лазеров, и указан способ накачки.

Твердыми растворами называют вещества, имеющие одинаковый тип кристаллической решетки и способные

Таблица 34.6. **Материалы полупроводниковых лазеров [54]**

Тип соединения	Рабочее вещество	Длина волны, мкм	Вид накачки*2
A^3B^5	GaN	0,36	О
	GaAs	0,83—0,92	ИОЭП
	InP	0,89—0,91	ИОП
	GaSb	1,5—1,6	ИОЭ
	InAs	3,0—3,2	ИОЭ
	InSb	4,8—5,3	ИОЭ
	(Ga, In) P*1	0,56—0,9 [56]	ИО
	(Al, Ga) As*1	0,63—0,9 [56]	ИЭ
	Ga (As, P)*1	0,63—0,9 [56]	ИЭ
	(Al, Ga) (PAs)	0,63—0,9 [56]	ИЭ
	(In, Ga) As*1	0,9—3,4 [56]	ИО
	In (P, As)	0,9—3,2	И
	Ga (As, Sb)	0,95—1,6	И
	In (As, Sb)	1,0—5,3	И
	(Al, Ga) Sb	1,2—1,8 [56]	Э
	(In, Ga) (P, As)	0,62—3,2	И
	(Al, Ga) (As, Sb)	0,62—1,6	И
A^2B^6	ZnO	0,37	ОЭ
	Zn	0,33	ОЭ
	ZnSe	0,46	Э
	ZnTe	0,53	Э
	CdS	0,49	ИЭП
	CdSe	0,69	ИЭ
	CdTe	0,79	Э
	(Zn, Cd) S	0,33—0,49	И
	C (S, Se)	0,59—0,69	ИЭ
	(Cd, Hg) Te	3,8—4,1	И
A^4B^6	PbS	4,3	ИЭ
	PbSe	8,5	ИЭ
	PbTe	6,5	ИЭ
	P (S, Se)	4,7—5,5	ИОЭ
	(Pb, Sn) Se	8,5—32	ИЭ
	(Pb, Sn) Te	6,5—32	ИЭ
	(Pb, Ge) Te	4,4—6,5	И
$(A^4, A^2)B^6$	(Pb, Cd) S	3,5	И
A^6	Te	3,7	Э
A^3B^6	GaSe	0,59—0,60	ОЭ
	InSe	0,97	Э
$A_2^3B^6$	In_2Se	1,6	Э
$A_3^2B_2^5$	C_3P_2	2,1	О
$A^2B^4C_2^6$	$CdSnP_2$	1,1	Э
	$CdSiAs_2$	0,77	Э

*1 Лазеры производятся промышленностью.

*2 Здесь И — инжекция, Э — электронный пучок, О — оптическая накачка, П — пробой.

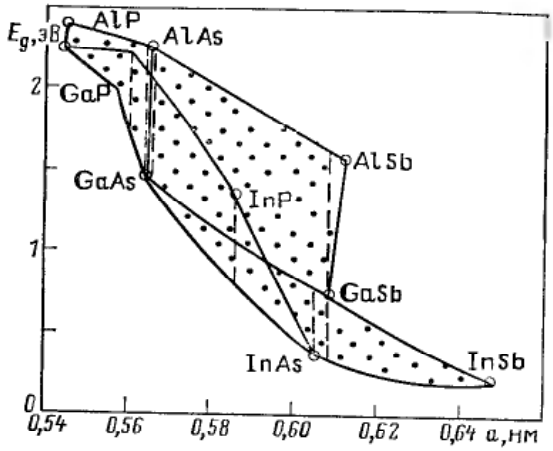


Рис. 34.12. Зависимость ширины запрещенной зоны от периода решетки в полупроводниковых соединениях типа A^3B^5 и твердых растворах на их основе [60]

образовывать непрерывный ряд растворов с переменной концентрацией компонентов, что позволяет изменять ширину запрещенной зоны полупроводника (рис. 34.12).

В гетеролазерах требуется, чтобы контактирующие материалы обладали одинаковым типом и периодом решетки. Единственным тройным твердым раствором, в котором изменение ширины запрещенной зоны практически не сопровождается изменением периода решетки, является $Al_xGa_{1-x}As$ (рис. 34.12), что и обусловило широкое применение этого соединения в гетеропереходах Al_xGa_{1-x}—GaAs. Для четверных соединений можно добиться совпадения периода решетки с периодом бинарного соединения с помощью изопериодического замещения двух атомов. Так, в четверном растворе $Ga_xIn_{1-x}P_{1-y}As_y$ можно подобрать x и y так, чтобы влияние Ga и As на период взаимно компенсировалось и период решетки совпадал с периодом бинарного соединения InP. Смешение в твердом растворе соединений, обладающих зонами разных типов, позволяет производить переход от прямозонного проводника к непрямозонному изменением концентрации компонентов. Примером таких соединений служат GaP_xAs_{1-x}; $In_{1-x}Ga_xP$; $Al_xGa_{1-x}As$. В твердом растворе $Pb_{1-x}Sn_xSe$ при $x=0{,}15$ ($T=12$ К) ширина запрещенной зоны проходит через нуль, что позволяет создать длинноволновые лазеры (длина волны генерации $\lambda=32$ мкм).

Инжекционные лазеры. Простейший инжекционный лазер, или гомолазер, по существу представляет собой сильно легированный p—n-переход, при смещении которого в прямом направлении неосновные носители заряда инжектируются сквозь p—n-переход на расстояние порядка диффузионной длины и рекомбинируют с основными. При фоторекомбинации в плоскости p—n-перехода возникает вынужденное излучение. Пороговая плотность тока такого лазера на GaAs составляет 20—50 кА/см² при $T=20$°С. Уменьшение пороговой плотности тока до 5 кА/см² достигнуто в односторонних гетероструктурах, где наряду с p—n-переходом имеется гетеропереход в полупроводник с большей шириной запрещенной зоны, например гетеропереход GaAs—$Al_xGa_{1-x}As$. Гетеропереход расположен на расстоянии от p—n-перехода, меньшем диффузионной длины, и препятствует диффузии неосновных носителей (электронное ограничение), увеличивая тем самым их концентрацию. Поскольку большей подвижностью обладают обычно электроны, гетеропереходами, как правило, являются p—p-переходы. Еще большее уменьшение пороговой плотности тока (для значений ниже 1кА/см²) при $T=20$ °С достигнуто в двойных гетероструктурах (ДГС) использованием как ограничения неосновных носителей заряда (электронов и дырок), так и оптического ограничения генерируемого излучения. В ДГС активная область расположена между двумя гетеропереходами. Например, в ДГС на основе $Al_xGa_{1-x}As$ это слой p GaAs с шириной запрещенной зоны $E_g=1{,}4$ эВ, расположенный между слоями p $Al_xGa_{1-x}As$ ($E_g=1{,}8$ эВ).

Поскольку показатель преломления узкозонного полупроводника с ДГС больше, чем показатель преломления широкозонных слоев, возникает волновод, локализующий генерируемое излучение вблизи активной области. Выходная плотность мощности полупроводникового лазера ограничена лучевой прочностью кристалла, поэтому для повышения выходной мощности гетеролазера используют раздельное ограничение носителей и излучения в пятислойных структурах, например:

p $Al_xGa_{1-x}As$	$E_g=1{,}8$ эВ;
p $Al_yGa_{1-y}As$	$E_g=1{,}5$ эВ;
p GaAs	$E_g=1{,}4$ эВ;
n $Al_yGa_{1-y}As$	$E_g=1{,}5$ эВ;
n $Al_xGa_{1-x}As$	$E_g=1{,}8$ эВ;

причем $x\approx0{,}3$; $y\approx0{,}1$.

Активным слоем является GaAs, электронное ограничение присутствует на границах слоя GaAs, а стенками волновода служат переходы между $Al_xGa_{1-x}As$ и $Al_yGa_{1-y}As$. Раздельное ограничение по носителям и излучению в пятислойных структурах позволяет также без ухудшения свойств волновода значительно уменьшить размеры активного слоя, что приводит к уменьшению порогового тока. Для получения генерации в широком спектральном диапазоне в ДГС помимо уникальной структуры $Al_xGa_{1-x}As$ используются многокомпонентные твердые растворы (рис. 34.13).

Для того чтобы ширина активной области лазера была сравнима с толщиной гетероперехода или не сильно превышала ее, применяют ограничение носителей и излучения в плоскости гетероперехода. Лазеры такой конфигурации иазывают полосковыми. В простейшем полосковом лазере инжекция носителей заряда производится через полосковый контакт при этом осуществляется только электронное ограничение. В более сложных структурах боковому ограничению подвергаются и распределение носителей, и излучение лазера. Методы ограничения носителей сходны с теми, которые применяются для ограничения носителей и излучения в направлении, перпендикулярном плоскости лазера, т. е. p—n-

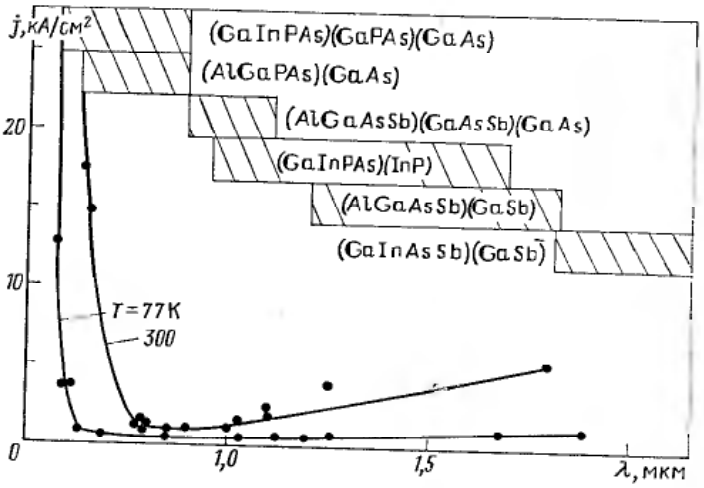


Рис. 34.13. Перекрытие спектральных диапазонов четверными системами типа A^3B^5 и спектральная зависимость пороговых плотностей тока в инжекционных гетеролазерах [56]

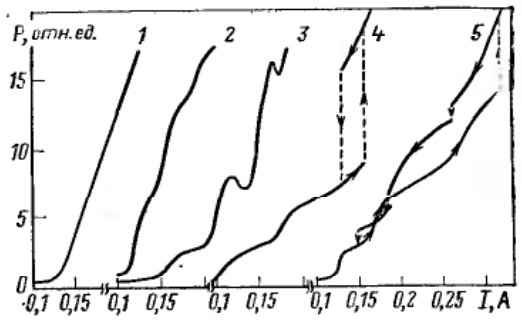


Рис. 34.14. Примеры ватт-амперных характеристик непрерывных полосковых гетеролазеров:

1 — линейные; *2*, *3* — гладкие нелинейные (*2* — монотонные, *3* — немонотонные); *4*, *5* — разрывные (*4* — простая петля, *5* — самопересекающаяся петля с разрывами) [57]

переходы и гетероструктуры используются в боковом направлении. Помимо того, возможно геометрическое боковое ограничение. Если в полосковых лазерах отсутствует боковое оптическое ограничение, то зависимость мощности выходного излучения от тока накачки становится нелинейной (рис. 34.14). Это связано с тем, что поперечный размер лазерной моды в полосковых лазерах сравним с шириной пространственного распределения коэффициента усиления. В максимуме интенсивности лазерной моды происходит наиболее эффективный съем инверсии, вследствие чего распределение инверсии и коэффициента преломления становится более благоприятным для генерации другой моды. Изменение генерируемой моды обусловливает особенности ватт-амперных характеристик полоскового лазера.

Объем активной среды лазера, накачиваемого электронным пучком или светом, в 10^4—10^6 раз больше, чем у инжекционного лазера, что позволяет поднять мощность выходного излучения на несколько порядков. Так, если выходная мощность инжекционного лазера не превышает сотни ватт, то в лазере с электронной накачкой получена мощность 1—2 кВт, а в GaAs-лазере с оптической накачкой 40 кВт [55].

34.6. ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ АКТИВАТОРАМИ

В жидкостных лазерах в качестве активных сред используются растворы, содержащие ионы редкоземельных элементов (TR-ионы). Генерация осуществляется на переходах с метастабильных уровней TR^{3+}-ионов. Для возбуждения применяется оптическая накачка с помощью ксеноновых газоразрядных ламп.

В жидких лазерных материалах может быть достигнута концентрация активных ионов того же порядка, что и в лазерных стеклах. Это позволяет получить большие энергии и мощности излучения с единицы объема активного вещества. В то же время сильная зависимость показателя преломления от температуры обусловливает значительные оптические неоднородности, возникающие при накачке активной среды, что приводит к ухудшению генерационных характеристик лазеров и увеличению расходимости лазерного пучка. Применение прокачки активной жидкости через лазерную кювету позволяет реализовать как периодический, так и непрерывный режим работы лазера.

Жидкие лазерные материалы с TR^{3+}-ионами делятся на два класса: металлоорганические, или хелатные, и неорганические, или апротонные.

Металлоорганические жидкостные лазеры. Активными элементами в металлоорганических лазерах являются трехвалентные ионы редкоземельных элементов, связанные с органическими группами, или лигандами. Лазерный эффект осуществляется на переходах между энергетическими уровнями TR^{3+}-ионов, а поглощение энергии накачки происходит через полосы поглощения лиганда. Хелаты имеют очень большие коэффициенты поглощения (около 100 $см^{-1}$), поэтому лазерный эффект осуществляется только в тонких слоях вещества. Металлоорганические жидкостные лазеры генерируют в режиме одиночных импульсов.

Различают два главных типа лазерных компаундов:

$$TR^{3+}\ [лиганд]_{-4}Q^{+};\quad TR^{3+}\ [лиганд]_{-3},$$

где Q^+ означает катион.

Наиболее часто в металлоорганических жидкостных лазерах употребляются следующие лиганды, катионы и растворители.

Лиганды: трифторацетилацетонат-ион (ТФАА$^-$), бензоилацетонат-ион (БА$^-$), бензоилтрифторацетонат-ион (БТФА$^-$), дейтерированный бензоилтрифторацетонат-ион (ДБТФА$^-$), ортофторбензоилфторацетонат-ион (ОФБТФА$^-$), метафторбензоилтрифторацетонат-ион (МФБТФА$^-$), парафторбензоилтрифторацетонат - ион (ПФБТФА$^-$), ортохлорбензоилтрифторацетонат - ион (ОХБТФА$^-$), метахлорбензоилтрифторацетонат - ион (МХБТФА$^-$), парахлорбензоилтрифторацетонат - ион (ПХБТФА$^-$), ортобромбензоилтрифторацетонат - ион (ОББТФА$^-$), метабромбензоилтрифторацетонат - ион (МББТФА$^-$), парабромбензоилтрифторацетонат- - ион (ПББТФА$^-$), дибензоилметанат-ион (ДБМ$^-$), теноилтрифторацетонат ион (ТТФА$^-$), пентафторпропионат-ион (ПФП$^-$), 1,10-фенантролин (Фен), дейтерированный трибутилфосфат (ДТБФ).

Катионы: пиперидиний (Пип$^+$), дейтерированный пиперидиний (ДПип$^+$), пирролидиний (Пирр$^+$), имидазолий (Им$^+$), диметил-аммоний (ДмА$^+$).

Комбинированные растворители (в скобках указано объемное отношение):

№ 1 — $CH_3CH_2OH : CH_3OH$ (3 : 1);
№ 2 — $CH_3CH_2OH : CH_3OH : (CH_3)_2NCHO$ (12:4:1);
№ 3 — $CH_3CH_2OH : CH_3OH : (CH_3)_2NCHO$ (15 : 5 :2);
№ 4 — $CH_3CH_2OH : CH_3OH : (CH_3)_2NCHO$ (9:3:2);
№ 5 — $CH_3CH_2OH : (CH_3)_2NCHO : CH_3CH_2CH_2OH$ (14 : 5 :2);
№ 6 — $CCl_4 : CH_2CHCN$ (9 : 1);
№ 7 — $CH_3CH(OC_2H_5)CN : CH_3CN : C_2H_5OCH_2CH_2OH$ (2 : 2 : 1).

Характеристики ряда металлоорганических жидкостных лазеров приведены в табл. 34.7. Генерация на комплексах Eu^{+3} происходит на переходе $^5D_0 \longrightarrow {}^7F_2$, на комплексах Nd^{3+} — на переходе $^4F_{3/2} \longrightarrow {}^4I_{11/2}$.

Неорганические жидкостные лазеры. Активные среды неорганических жидкостных лазеров представляют собой растворы соединений TR^{3+}-ионов в неорганических растворителях сложного состава. Лазерный эффект достигнут пока только для ионов Nd^{3+} (табл. 34.8). Генерация идет по четырехуровневой схеме на переходе $^4F_{3/2} \longrightarrow {}^4I_{11/2}$ с поглощением света накачки собственными полосами поглощения Nd^{3+}. Неорганические жидкостные лазеры могут работать с циркуляцией рабочего вещества, дают высокие значения выходной мощности. Эти лазеры работают как в режиме свободной генерации, так и с модуляцией добротности.

Более подробные сведения о жидкостных лазерах содержатся в [1].

Таблица 34. 7. **Металлоорганические лазерные жидкости [1]**

Активный комплекс	Растворитель	Длина волны генерации, мкм	Концентрация комплекса, моль/л	Люминесцентное время жизни, мкс	Ширина линии люминесценции, $см^{-1}$
Eu^{3+} $(БА^-)_4$ $Пип^+$	№ 1	0,6130	$8{,}7\cdot10^{-3}$	500	21
Eu^{3+} $(БА^-)_4$ $Пип^+$ + CH_3COONa	№ 1 или № 2	0,6131	$1\cdot10^{-2}$	—	21
		0,6114	$2\cdot10^{-2}$	—	23
Eu^{3+} $(БА^-)_4$ Na^+	№ 3 или № 5	0,6111	$2\cdot10^{-2}$	670	19
Eu^{3+} $(БА^-)_4$ NH_4^+	№ 1	0,6130	$1{,}5\cdot10^{-2}$	—	—
Eu^{3+} $(ДБМ^-)_4$ $Пип^+$	№ 4	0,6120	$1{,}5\cdot10^{-2}$	—	16
Eu^{3+} $(ДБМ^-)_4$ $Пирр^+$	CH_3CN	—	$2{,}5\cdot10^{-3}$	—	—
Eu^{3+} $(ТФАА^-)_4$ NH_4^+	№ 1	0,6122	$1{,}5\cdot10^{-2}$	—	—
	CH_3CN	0,6119	$1\cdot10^{-2}$	—	—
Eu^{3+} $(ТТФА^-)_4$ $ДМА^+$	CH_3CN	0,6125	$5\cdot10^{-3}$	—	—
Eu^{3+} $(БТФА^-)_4$ $Им^+$	CH_3CN	0,6118	$7{,}5\cdot10^{-3}$	—	69
Eu^{3+} $(БТФА^-)_4$ $Пирр^+$	CH_3CN	0,6118	$5\cdot10^{-3}$	—	107
Eu^{3+} $(БТФА^-)_4$ $Пип^+$	CH_3CN	0,6119	$1\cdot10^{-2}$	—	91
Eu^{3+} $(БТФА^-)_4$ $ДПип^+$	№ 7	—	$1{,}135\cdot10^{-2}$	700	—
Eu^{3+} $(ДБТФА^-)_4$ $Пип^+$	№ 7	—	$1{,}135\cdot10^{-2}$	680	—
Eu^{3+} $(ДБТФА^-)_4$ $ДПип^+$	№ 7	—	$1{,}135\cdot10^{-2}$	660	—
Eu^{3+} $(БТФА^-)_4$ $ДМА^+$	CH_3CN	0,61175	$7{,}5\cdot10^{-3}$	—	83
Eu^{3+} $(ОФБТФА^-)_4$ $ДМА^+$	CH_3CN	0,61167	$7{,}5\cdot10^{-3}$	—	80
Eu^{3+} $(МФБТФА^-)_4$ $ДМА^+$	CH_3CN	0,61178	$7{,}5\cdot10^{-3}$	—	87
Eu^{3+} $(ПФБТФА^-)_4$ $ДМА^+$	CH_3CN	0,61173	$7{,}5\cdot10^{-3}$	—	83
Eu^{3+} $(ОХБТФА^-)_4$ $ДМА^+$	CH_3CN	0,61174	$7{,}5\cdot10^{-3}$	—	67
Eu^{3+} $(МХБТФА^-)_4$ $ДМА^+$	CH_3CN	0,61171	$7{,}5\cdot10^{-3}$	—	85
Eu^{3+} $(ПХБТФА^-)_4$ $ДМА^+$	CH_3CN	0,61172	$7{,}5\cdot10^{-3}$	—	85
Eu^{3+} $(ОББТФА^-)_4$ $ДМА^+$	CH_3CN	0,61174	$7{,}5\cdot10^{-3}$	—	67
Eu^{3+} $(МББТФА^-)_4$ $ДМА^+$	CH_3CN	0,61173	$7{,}5\cdot10^{-3}$	—	83
Eu^{3+} $(ПББТФА^-)_4$ $ДМА^+$	CH_3CN	0,61171	$7{,}5\cdot10^{-3}$	—	87
Tb^{3+} $(ТФАА^-)_3$	CH_3CN	0,5470	$2{,}5\cdot10^{-3}$	—	—
Nd^{3+} $(ПФП^-)_3$ Фен	$(CD_3)_2SO$	1,057	$2\cdot10^{-1}$		140
Nd^{3+} $(ТТФА^-)_4$ $Пирр^+$	№ 6	—	$1\cdot10^{-2}$	—	—
Nd^{3+} $(NO_3^-)_3$ $(ДТБФ)_3$	C_6F_6 или CCl_4	1,054	$2\cdot10^{-1}$	11	100

Таблица 34.8 **Неорганические лазерные жидкостн [1]**

Состав лазерной жидкости	Длина волны генерацин, мкм	Концентрация активатора, моль/л	Люминесцентное время жизнн, мкс	Ширина линии люминесценции, $см^{-1}$
Nd^{3+} — $SeOCl_2$ — $SnCl_4$	1,056	0,5 м	110	145
	1,058	0,1 м	83	—
Nd^{3+} -- $SeOCl_2$ — $SbCl_5$	1,058	0,3 м	230	165
Nd^{3+} — $SOCl_2$ — $GaCl_3$ [2]	—	—	225	—
Nd^{3+} — $POCl_3$ — $SnCl_4$	1,0575	—	270	102
	1,0525	4%*	280	145
Nd^{3+} — $POCl_3$ — $TiCl_3$	1,0522	0,86%*	180	100
	1,0525	3%	230	—
Nd^{3+} — $POCl_3$ — $AlCl_3$	1,0542	—	140	—
	1,054	0,15 м	300	—
Nd^{3+} — $POCl_3$ — $ZrCl_4$	1,05219	—	—	—
Nd^{3+} — PBr_3 — $AlBr_3$ — $SbBr_3$	1,0522	0,3 м	300	145
	1,066	0,5%	230	113

* Массовое содержание.

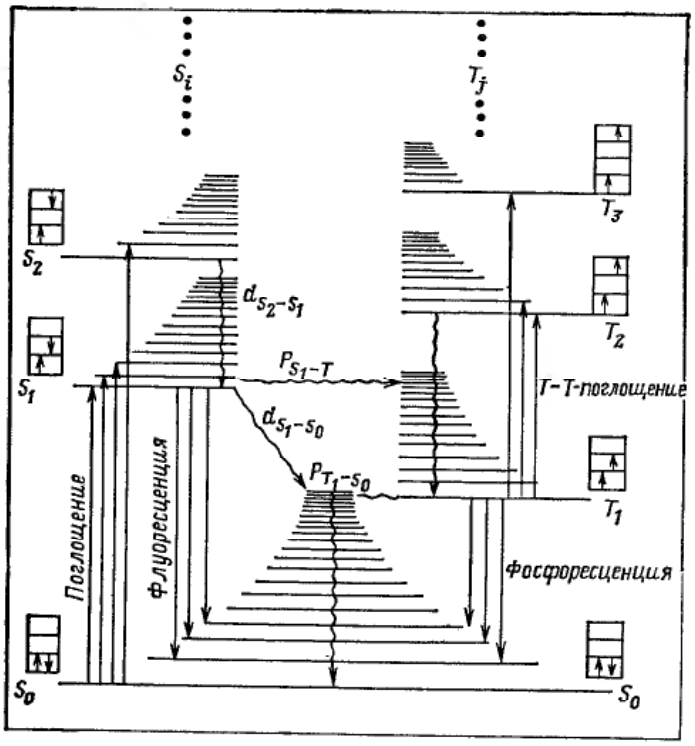


Рис. 34.15. Схема синглетных (S_i) и триплетных (T_j) уровней энергии сложной молекулы (у каждого уровня показана относительная ориентация спинов внешних электронов)

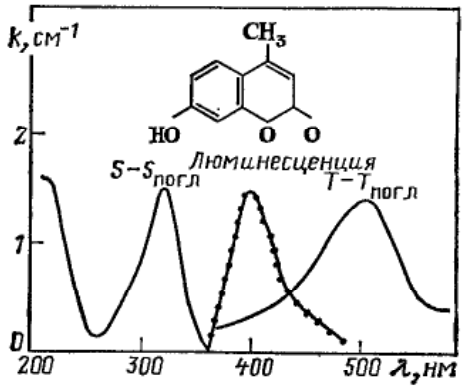


Рис. 34.16. Спектры поглощения ($S—S_{погл}$), люминесценции и триплет-триплетного поглощения ($T—T_{погл}$) нейтральной формы 7-окси-4-метилкумарина

34.7. ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ

В настоящее время красителями принято называть химические соединения с разветвленной системой сопряженных химических связей, обладающие интенсивными полосами поглощения в видимой или ближней ультрафиолетовой области спектра. Схема уровней энергии молекулы красителя приведена на рис. 34.15. Общими особенностями спектроскопических характеристик красителей являются зеркальная симметрия спектров поглощения S_0—S_1 и люминесценции, а также частичное перекрытие спектра люминесценции спектром поглощения (рис. 34.16).

Усиление света и генерация света в растворах красителей при их оптическом возбуждении обусловлены возникновением инверсной населенности колебательных подуровней первого возбужденного синглетного состояния S_1 по отношению к колебательным подуровням основного состояния S_0. Коэффициент усиления с учетом триплет-триплетного поглощения и поглощения из возбужденного состояния S_1 имеет следующий вид [62]:

$$k_{\text{ус}} = \varkappa_{S_1 \to S_0}(\nu)\left[\frac{n_{S_1}}{n}\left(1 - \frac{B_{S_1 \to S_i}(\nu)}{B_{S_1 \to S_0}(\nu)} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \frac{n_{S_0}}{n_{S_1}} e^{-\frac{h(\nu_{эл}-\nu)}{kT}} - \frac{n_{T_1}}{n_{S_1}} \frac{B_{T_1 \to T_j}(\nu)}{B_{S_1 \to S_0}(\nu)}\right)\right]. \quad (34.1)$$

Здесь $\varkappa_{S_1 \to S_0}(\nu) = (h\nu/v) B_{S_1 \to S_0}(\nu) n$ — предельный коэффициент усиления; v, см/с — скорость света в среде; $h\nu$, Дж — энергия кванта; $B_{S_1 S_0}$, $B_{S_1 \to S_i}$, $B_{T_1 \to T_j}$, Дж$^{-1}$·с$^{-1}$·см^3 — коэффициенты Эйнштейна для вынужденного испускания, синглетного и триплетного поглощения соответственно; $\frac{n_{S_0}}{n_{S_1}}$, $\frac{n_{S_1}}{n}$, $\frac{n_{T_1}}{n_{S_1}}$ — относительные населенности уровней S_0, S_1, T_1; n, см$^{-3}$ — концентрация молекул красителя.

Усиление невозможно при

$$B_{S_1 \to S_i}(\nu) \geqslant B_{S_1 \to S_0}(\nu), \quad (34.2)$$

а также при накоплении на триплетном уровне T_1 такого числа молекул, что

$$n_{T_1} / n_{S_1} \geqslant B_{S_1 \to S_0}(\nu) / B_{T_1 \to T_j}(\nu). \quad (34.3)$$

В стационарном режиме

$$n_{T_1} / n_{S_1} = P_{S_1 \to T_1} / P_{T_1 \to S_0}, \quad (34.4)$$

где $P_{S_1 \to T_1}$, $P_{T_1 \to S_0}$ — вероятности соответствующих переходов. Следовательно, невозможен стационарный режим генерации лазера на красителе, для которого выполняется условие

$$B_{S_1 \to S_0}(\nu) \ll B_{T_1 \to T_j}(\nu) P_{S_1 \to T_1} / P_{T_1 - S_0}. \quad (34.5)$$

При импульсном возбуждении возможна генерация и при выполнении условия (34.5). Из (34.5) следует, что эффективные лазерные красители должны обладать: высоким квантовым выходом люминесценции; слабым перекрытием спектров T_1—T_j, и S_1—S_i поглощения со спектром люминесценции; малым накоплением молекул в триплетном состоянии, что возможно при малом значении вероятности $P_{S1} \longrightarrow {}_{T1}$ и большом значении вероятности $P_{T1} \longrightarrow {}_{S0}$. Насколько жесткими являются эти требования, можно судить по тому, что из тысяч промышленных красителей генерационной способностью при накачке импульсами наносекундной длительности обладают лишь несколько сот соединений. При накачке микросекундными импульсами генерируют десятки соединений, а при более длинных импульсах, с λ порядка ста микросекунд, — вообще единичные красители. Анализ генерационной эффективности красителей различных классов показывает, что в большей или меньшей степени указанным выше требованиям удовлетворяют следующие красители: производные оксазола, оксадиазола, бензола и их конденсированных аналогов; производные кумарина, родамина, оксазина и полиметиновые красители.

В табл. 34.9 представлены спектрально-люминесцентные и генерационные свойства наиболее эффективных лазерных красителей.

Таблица 34.9. **Спектрально- люминесцентные и генерационные характеристики наиболее эффективных лазерных красителей [62]**

[$\lambda^{макс}_{погл}$, $\lambda^{макс}_{люм}$ — длины волн, соответствующие максимумам спектров поглощения и люминесценции; η — квантовый выход люминесценции; $B_{S_0 \to S_1}\left(\lambda^{макс}_{погл}\right)$ — коэффициент Эйнштейна в максимуме спектра поглощения; τ_{S_1} — время жизни первого возбужденного синглетного состояния S_1; $\lambda_{нак}$ — длина волны излучения накачки; $(\lambda_1 - \lambda_2)_{ген}$ — поглощение спектра генерации; γ — КПД генерации; $K(\lambda_{нак})$ — коэффициент поглощения на длине волны накачки; FL — накачка газоразрядной импульсной лампы. Растворители: DMF — N, N'-диметилформамид; Etan — этанол; EG — этиленгликоль. Индекс «осн» означает основание, «кисл» — кислота]

Краситель	Растворитель	$\lambda^{макс}_{погл}$, нм	$\lambda^{макс}_{люм}$, нм	η, %	$B_{S_0 \to S_1}\left(\lambda^{макс}_{погл}\right)$, 10^7 Дж$^{-1}\cdot$с$^{-1}\cdot$см^3	τ_{S_1}, 10^{-10} с	$\lambda_{нак}$, нм	$(\lambda_1-\lambda_2)_{ген}$, нм	γ, %	$K(\lambda_{нак})$, см$^{-1}$
p-терфенил	DMP	284	345	30	—	—	265	330—360	—	—
	$C_4H_8O_2$	280	343	70	—	—	265	330—362	—	—
	Etan	277	340	85	—	—	265	330—362	—	—
p-кватерфенил	DMF	300	373	68	—	—	337	355—390	—	—
	$C_6H_5CH_3$	298	374	49	—	—	265	362—390	—	—
							337	362—390	—	—
2-фенил-5-(4′-бифенилил)-1, 3, 4-оксадиазол (PBD)	$C_4H_8O_2$	307	361	86	—	—	347	370—386	31	7
							337	372—400	—	—
	Etan	302	365	21	—	—	347	372—384	6	3
	$C_6H_5CH_3$	308	365	24	—	—	347	374—384	17	20
2,5-дн-(4′-бифенил)-1, 3, 4-оксадиазол (BBD)	$C_6H_5CH_3$	312	383	47	—	—	347	374—386	17	18
2,5-дифеннл - 1, 3, 4-оксадиазол (PPD)	$C_4H_8O_2$	284	334	65	—	—	337	383—395	—	—
	Etan	280	332	82	—	—	337	383—395	—	—
2,5-ди-α-нафтил-1, 3, 4-оксадназол (αNαND)	$C_4H_8O_2$	—	—	—	—	—	337	384—397	—	—
	$C_6H_5CH_3$	337	392	75	—	—	347	388—394	14	20
1,4-дифенил-1,3-бутадиен	$C_6H_5CH_3$	333	383	23	—	—	265	383	—	—
							353	383	—	—
2,5-дифенил-1, 3-оксазол (PPO)	$C_6H_5CH_3$	306	366	99	4	16	347	360—370	4	14
	DMF	305	365	77	5	10	347	372—392	5	16
	$C_4H_8O_2$	304	364	90	5	11	337	375—387	—	—
							347	378—386	5	6
2-(α-нафтил)-5-фенил-1, 3-оксазол (αNPO)	$C_4H_8O_2$	334	400	77	—	—	347	396—406	13	23
2,5-ди-(4′-бифенил)-1, 3-оксазол (BBO)	$C_6H_5CH_3$	340	409	83	—	—	347	404—420	16	19
	$C_4H_8O_2$	340	406	76		—	337	404—420	—	—
	Etan				—		347	408—418	29	22
		340	407	96	—	—	347	У порога	—	4
1, 4-ди-(5′-феннл--1′, 3′-оксазол-2′-ил)-бензол (POPOP)	$C_4H_8O_2$	—	—	—	—	—	337	414—426	—	—
							347	416—418	28	18
	$C_6H_5CH_3$	360	420	84	8	14	347	416—418	27	22
	DMF	361	426	87	10	11	347	428—430	22	19

Краситель	Растворитель	$\lambda^{макс}_{погл}$, нм	$\lambda^{макс}_{люм}$, нм	η, %	$B_{S_0 \to S_1}\left(\lambda^{макс}_{погл}\right)$, 10^7 Дж$^{-1}\cdot$с$^{-1}\cdot$см^3	τ_{S_1}, 10^{-10} с	$\lambda_{нак}$, нм	$(\lambda_1-\lambda_2)_{ген}$, нм	γ, %	$K(\lambda_{нак})$, см$^{-1}$
1, 4-ди-[5′-(4′′-метилфенил)-1′, 3′-оксазол-2′-ил]-бензол (диметил POPOP; TOPOT)	Etan $C_4H_8O_2$	364 364	431 429	86 88	— —	— —	347 347	424—432 424—436	24 34	7 20
2-[4′-(4′′-фенилстирил)-фенил]-5-феннл-1, 3-оксазол	DMF	368	435	99	—	—	347	434—438	17	20
1, 4-дистирилбензол	DMF	356	—	—	8	—	347 347 347	408—422 408—424 408—422	29 23 14	32 13 7
1-стирил-4-[ω-винил-(*p*-бифенилнл)] бензол	DMF	370	—	—	3	—	347 347 347	424—442 426—442 430—442	30 23 16	24 12 6
4-метил-7-диэтиламинокумарин (кумарин 1)	Etan	375	454	70	5	29	337 347 FL	442—476 448—460 457—475	— 25 0,1	— 19 30
4-метил-7-гидроксикумарин (β-метилумбеллиферон: кумарин 4)	$Etan_{осн}$	370	455	95	3	42	337 347 FL	444—473 446—462 456—467	— 17 0,1	— 19 30
7-гидроксикумарин	$Etan_{(осн)}$	375	461	95	—	—	337 347 FL	446—480 454—474 457—465	— 35 0,1	— 16 30
4-метил-6-гексил-7-гидроксикумарин	$Etan_{(осн)}$	386	460	90	—	—	337 347 FL	449—478 450—480 458—472	— 8 0,15	— 16 30
3-карбоэтокси-7-гидроксикумарин (кумарин 15)	$Etan_{(осн)}$	416	460	70	—	—	347 337 FL	450—475 455—471 460—480	16 — 0,12	16 — 30
3, 4-диметил-7-гидроксикумарин	$Etan_{(осн)}$	366	460	90	—	—	347 337 FL	450—485 452—483 460—480	15 — 0,15	16 — 30
Кумарин 102	Etan	396	—	—	—	—	347 337 FL	450—500 460—500 480—500	20 — 0,18	16 — 30
3-хлор-4-метил-7-ацетоксикумарин	$Etan_{(осн)}$	394	476	69	4	28	337 347 FL	463—498 476—484 474—507	 13 0,1	 22 30
3-карбоэтокси-6-гексил-7-гидроксикумарин	$Etan_{(осн)}$	426	454	—	—	—	337 347 FL	465—483 465—485 476—484	— — 0,13	— — 30

Краситель	Растворитель	$\lambda^{макс}_{погл}$, нм	$\lambda^{макс}_{люм}$, нм	η, %	$B_{S_0 \to S_1}\left(\lambda^{макс}_{погл}\right)$, 10^7 Дж$^{-1}\cdot$с$^{-1}\cdot$см^3	τ_{S_1}, 10^{-10} с	$\lambda_{нак}$, нм	$(\lambda_1-\lambda_2)_{ген}$, нм	γ, %	$K(\lambda_{нак})$, см$^{-1}$
3-фенил-7-ацетоксикумарин	Etan$_{(осн)}$	400	475	76	6	30	337 347 FL	470—494 474—494 481—495	— 19 0,1	— 14 30
3-ацетил-6-гексил-7-гидроксикумарин	Etan$_{(осн)}$	443	468	—	—	—	347 FL	475—505 494—500	— 0,1	— 30
Кумарин 334	Etan	454	496	—	—	—	337 347 FL	475—508 475—510 513—518	— — 0,15	— — 30
3-циано-6-гексил-7-гидроксикумарин	Etan$_{(осн)}$	444	465	—	—	—	337 347 FL	490—510 490—510 502—509	— — 0,15	— — 30
Кумарин 1 + диангидрид ПТК	Etan$_{(осн)}$	—	—	—	—	—	347	495—515	10	20+0,7
Кумарин 1 + диангидрид ПТК	Etan$_{(осн)}$	—	—	—	—	—	347	505—525	10	20+2
1-амино-*N*-метилантрапиридон	DMF	454	500	33	3	45	347 347	502—512 504—510	3,5 4	27 15
Амидин	DMF	466	540	37	2	71	347 347	537—548 540—550	8 7	16 28
Антрапиридон 8	Etan	—	—	—	—	—	347	545—575	8	18
Диангидрид перилен-3, 4, 9, 10-тетракарбоновой кислоты (диангидрид ПТК)	Etan$_{(осн)}$	468	486	99	4	119	337 347	512—530 516—532	— 8	— 7
Флуоресцеин Na (уранин)	Etan	500	522	61	7	50	337 347 347 347	536—556 538—562 544—562 549—566	— 4 6 5	— 3 9 16
Незамещенный родамин (родамин 110)	Etan Etan$_{(кисл)}$	505 —	529 —	85 —	12 —	71 —	347 FL 347	554—570 556—567 564—574	4 0,15 5	8 23 18
Родамин 6G (родамин 6G — DN; в отечественных изданиях родамин Ж)	Etan	530	556	85	20	76	337 347 FL	568—595 570—580 583—593	— 22 0,5	— 17 23
Родамин G (родамин Y; в отечественных изданиях родамин 6Ж)	Etan	530	558	82	—	—	347 FL	574—586 580—598	20 0,4	16 23

Краситель	Растворитель	$\lambda^{макс}_{погл}$, нм	$\lambda^{макс}_{люм}$, нм	η, %	$B_{S_0 \to S_1}\left(\lambda^{макс}_{погл}\right)$, 10^7 Дж$^{-1}\cdot$с$^{-1}\cdot$см^3	τ_{S_1}, 10^{-10} с	$\lambda_{нак}$, нм	$(\lambda_1-\lambda_2)_{ген}$, нм	γ, %	$K(\lambda_{нак})$, см$^{-1}$
N, *N'*-тетраэтилродамин (родамин B; родамин C)	Etan	543	572	55	—	—	337 347 FL	584—612 596—616 611—624	— 15 0,25	— 15 23
Родамин 3B (родамин 4C)	Etan	555	578	61	20	37	347 337 FL	600—624 609—632 622—632	13 — 0,3	16 — 23
Оксазин 9 (крезиловый фиолетовый)	Etan	606	630	38	20	35	337 347 FL	651—689 652—684 660—700	— 5 0,25	— 7 23
Нильский голубой	Etan	635	676	—	—	—	337 347 FL	686—714 698—720 696—720	— 5 0,1	— 8 23
1, 1'-дифенил-3,3'-диэтил-5, 5'-дикарбоэтокси-2, 2'-имидадикарбоцианин иодид (№ 2636 У)	Etan DMF	618 —	652 —	35 —	63 —	20 —	347 347 347	660—720 681—693 687—702	— 8 14	— 15 3
1, 1'-дифенил-3,3'-диэтил-5, 5'-ди-(бензоксазол-2''-ил)-2, 2'-имидадикарбоцианин иодид (№ 1950 У)	Etan DMF	633 —	665 —	40 —	71 —	25 —	347 347	680—740 708—720	— 7	— 6
3,3'-диэтил-2,2'-оксатрикарбоцианин иодид (DOTC иодид)	Etan	689	718	53	—	—	694	730—740	37	18
3, 3'-диэтил-6, 7; 6', 7'-дибензо-10, 12-триметилен-11-хлор-2, 2'-оксатрикарбоцианин иодид (№ 2780У)	Etan DMF	752 —	780 —	13 —	48 —	12 —	694 694	790—825 792—822	17 30	20 20
1, 3, 3; 1', 3', 3'-гексаметил-4, 5; 4', 5'-дибензо-2, 2'-индодикарбоцианин иодид (№ 4568)	Etan EG	682 —	720 —	12 —	56 —	7 —	694 694 694	720—740 722—738 726—748	25 32 30	20 17 30
1, 3, 3; 1', 3', 3'-гексаметил-2, 2'-индотрикарбоцианин иодид (HITC иодид; № 341)	Etan	744	770	28	34	31	694 750	780—826 780—826	38 45	12 12
1, 3, 3; 1', 3', 3'-гексаметил-10, 12-триметилено-11-хлор-2,2'-индотрикарбоцианин иодид (№ 2781)	Etan DMF	742 —	805 —	3 —	22 —	2 —	694 750 694	816—844 816—844 816—844	28 40 33	19 19 19

Краситель	Растворитель	$\lambda^{макс}_{погл}$, нм	$\lambda^{макс}_{люм}$, нм	η, %	$B_{S_0 \to S_1}\left(\lambda^{макс}_{погл}\right)$, 10^7 Дж$^{-1}\cdot$с$^{-1}\cdot$см^3	τ_{S_1}, 10^{-10} с	$\lambda_{нак}$, нм	$(\lambda_1-\lambda_2)_{ген}$, нм	γ, %	$K(\lambda_{нак})$, см$^{-1}$
1, 3, 3; 1′, 3′, 3′-гексаметил-4, 5; 4′, 5′-дибензо-2, 2′-индотрикарбоцианин перхлорат (№ 3899)	Etan DMF EG	780 — —	844 — —	2 — —	44 — —	2 — —	694 694 694 770	844—890 844—890 844—890 844—890	8 10 17 17	20 20 20 20
1, 1′-дибензил-4, 4′-хинокарбоцианин бромид (№ 3963)	Etan EG DMF	706 723 —	730 735 —	2 16 —	55 — —	1 — —	694 694 694	740—760 740—760 742—762	14 36 30	15 15 15
1, 1′-ди-(2″-фенилэтилен)-4, 4′-хинокарбоцианин иодид (№ 3966)	Etan EG DMF	710 723 —	731 735 —	3 18 —	65 60 —	2 13 —	694 694 694	740—762 740—762 742—764	— 35 33	— 18 18
Дибензцианин С 1056	Etan	687	—	—	—	—	694	766—780	10	18
1, 1′-диметил-2, 2′-ди-(3″, 4″-диметоксифенил)-5, 6; 5′, 6′-дибенз-4, 4′-хинокарбоцианин иоднд	Etan	750	793	—	—	—	694	820—854	18	18
1, 1′-диметил-2, 2′-ди-(4″-метоксифенил)-5, 6; 5′, 6′-дибенз-4, 4′-хинокарбоцианин иодид	DMF	768	793	3	—	—	694	853—874	35	18
1, 1′-диметил-2, 2′-ди-(4″-хлорфенил)-5, 6; 5′, 6′-дибенз-4, 4′-хинокарбоцианин иодид	DMF	764	—	—	—	—	694 694	860—906 882—914	19 14	15 30
1, 1′-диметил-2, 2′-ди-(3″, 4″-метилен диоксифенил)-5, 6; 5′, 6′-дибенз-4, 4′-хинокарбоцианин иодид	Etan	768	800	3	—	—	694	874—883	35	18
1, 1′-диэтил-2, 2′-хинотрикарбоцианин иодид (№ 100)	Etan DMF	823 —	885 —	0,7 —	80 —	0,4 —	694 820 694	860—920 860—920 860—920	11 32 19	14 14 14

Продолжение табл. 34.9

Краситель	Растворитель	$\lambda^{макс}_{погл}$, нм	$\lambda^{макс}_{люм}$, нм	η, %	$B_{S_0 \to S_1}\left(\lambda^{макс}_{погл}\right)$, 10^7 Дж$^{-1}\cdot$с$^{-1}\cdot$см^3	τ_{S_1}, 10^{-10} с	$\lambda_{нак}$, нм	$(\lambda_1-\lambda_2)_{ген}$, нм	γ, %	$K(\lambda_{нак})$, см$^{-1}$
3, 3-диэтил-4, 5; 4′, 5′-ди-(5″-фенилтиофено-2″, 3″)-2,2′-тиазолодикарбоцианин иодид (№ 4201)	Etan	730	780	9	43	6	694	780—810	12	19
							730	780—810	19	19
	DMF	—	—	—	—	—	694	784—814	17	19
3, 3′-диэтил-4-кето-5-[(3-этиленбензтиазолиилидин-2)-1, 3-(2,2-диметилтриметилено)-бутенилидем]-7-этокси-2, 2′-тиазолнотиакарбоцианин бромид (4197)	Etan	725	800	0,5	27	0,3	694	824—866	24	10
							730	824—866	32	10
	DMF	—	—	—	—	—	694	824—866	7	10
3, 3′-диэтнл-9, 11-(о-фенилено)-2, 2′-тиадикарбоцианин иодид (№ 3734)	Etan	760	815	2	31	3	694	822—864	15	18
							730	822—864	24	18
	DMF	—	—	—	—	—	694	822—864	23	18
3, 3′-диэтил-2, 2′-тиатрикарбоцианин иодид (DTTC иодид; № 286)	Etan	763	790	34	74	25	694	800—830	22	19
							750	800—830	42	19
3, 3′-диэтил-2, 2′-тиатрнкарбоцианин бромид (DTTC бромнд)	Etan	765	—	—	—	—	694	820—838	21	18
3, 3′-диэтил-2, 2′-тиатетракарбоцианин иоднд (№ 440)	Etan	865	940	0,3	46	0,3	694	946—980	25	18
							820	946—980	49	18
	DMF						694	946—980	24	18
Нильский голубой А-оксазон; (9-диэтиламинобензо [а] феноксазинон-5; оксазин 17)	Etan	550	640	—	—	—	FL	659—672	0,2	23
Родамин 19	Etan	514	538	—	—	—	FL	564—573	0,2	23

Для возбуждения растворов красителей в импульсном режиме чаще всего используются рубиновый (694 нм, основная частота и вторая гармоника), неодимовый (1060 нм, основная частота, вторая, третья и четвертая гармоники), азотный (337 нм) и ксеноновый (172,5 нм) импульсные лазеры. Генерация может быть осуществлена практически при любой длине волны в диапазоне от 340 до 1100 нм при КПД, достигающем десятков процентов. Ширина спектра составляет 5—50 нм при отсутствии дисперсионных элементов в резонаторе и 10^{-1}—10^{-4} нм в дисперсионном резонаторе.

Наиболее распространенным источником накачки лазеров на красителях в непрерывном режиме является аргоновый лазер, мощность излучения которого составляет несколько ватт на линиях в синей и зеленой областях спектра. Излучение аргонового лазера фокусируется в область с размерами 10—20 мкм для превышения порога генерации. Для устранения термооптических иска-

жений, а также для выведения из зоны генерации продуктов фотораспада применяется прокачка красителя, чтобы за несколько микросекунд произвести полную смену красителя в активной области. Лазер на красителе с непрерывной накачкой может работать в режиме активной или пассивной синхронизации мод, причем в последнем режиме возможно получение импульсов длительностью $\Delta t \leqslant 10^{-12}$ с.

Для перестройки и сужения спектра генерации в лазерах на красителях используются дисперсионные светофильтры и призмы, интерферометры Фабри — Перо, дифракционные решетки, а также селективные элементы, работающие на принципе распределенной обратной связи. В РОС-лазерах обратная связь осуществляется за счет брэгговского отражения излучения от периодической структуры, возникающей в активной среде в результате модуляции ее показателя преломления. Введение одного селектирующего элемента сужает спектр генерации примерно до 1 нм без существенного снижения выходной мощности. Получение более узких линий достигается за счет комбинации нескольких селекторов и сопряжено со значительными потерями выходной мощности.

Более подробные сведения о лазерах на красителях можно найти в обзорах [61—62].

34.8. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ЦЕНТРАХ ОКРАСКИ

Твердотельные лазеры на центрах окраски в ионных кристаллах обладают: широкой областью длин волн генерации 0,7—3,3 мкм, высокой стабильностью частоты и малой шириной генерируемого спектра, возможностью работы в импульсно-периодическом и непрерывном режимах, высоким КПД.

Исходным лазерным материалом являются кристаллы фторидов и хлоридов щелочных металлов, а также фториды кальция и стронция. Используются также кристаллы с примесью. Воздействие на кристаллы ионизирующих излучений (γ-квантов, электронов высоких энергий, рентгеновского и коротковолнового ультрафиолетового излучений) или прокалка кристаллов в парах щелочного металла приводит к возникновению точечных дефектов кристаллической решетки, локализующих на себе электроны или дырки. Стимулированное излучение возникает на электронно-колебательных переходах в таких образованиях. Схема генерации центров окраски аналогична схемам лазеров на красителе.

Все представленные в табл. 34.8 непрерывные лазеры, за исключением четырех отмеченных (300 К), работают при температуре жидкого азота. Импульсные лазеры работают при $T = 20$ °С.

Более подробную информацию о лазерах на центрах окраски можно найти в [2, 63, 64].

Таблица 34.10. **Лазеры на центрах окраски в ионных кристаллах [63]**

Кристалл	Тип центра	Длина волны накачки, мкм	Область перестройки, мкм	КПД, %
		Непрерывные лазеры		
KCl — Li	F_A (II)	0,514 0,647	2.3—2,95	9,1
RbCl — Li	F_A (II)	0,647 0,676 0,753	2,5—3,33	2,5
KCl — Na	F_B (II)	0,47 0,53 0,568	2,25—2,65	2,3
RbCl — Na	F_B (II)	0,647 0,676	2,5—2,9	2,1
NaF	F_2^+	0,753	0,89—1,0	10
LiF	(?) (77 К)	0,647	0,82—1,07	60
	F_2^+ (300 К)	—	0,86—1.0	10
KF	F_2^+	1.064	1.22—1,5	46
KCl	F_2^+	1,34	1,6—1,78	—
NaCl	F_2^+	1,064	1,35—1,6	—
LiF	F_2^- (300 К)	1,064	1,14—1,2	2
NaCl — OH^-	F_2^+	1,06	1,36—1,77	—
KCl — OH^-	F_2^+	1,32 1,34	1,61—1,77	—
KCl — Na	$(F_2^+)_A$	1,32 1,34	1,62—1,91	4
KCl — Li	$(F_2^+)_A$	1,32 1,34	2.0—2.5	7
CaF_2 — Na	$(F_2)_A$ (300 К)	0,61	0,72—0,84	—
SrF_2 — Na	$(F_2)_A$ (300 К)	0,694	0,84—0,98	—
NaF	(F_2^+)	0,87	0,99—1.22	40
NaF	(F_2^+)	0,9	1,08—1,38	34
		Импульсные лазеры		
LiF	F_2	0,45	0,665—0,715	10
LiF	F_2	0,53	0,65—0,75	—
LiF	$F_2 \rightarrow F_2^+$	0,53	0,84—1,1	30
LiF — OH^-	F_2^+	0,69	0,84—1,02	6,5
LiF	F_2^-	1,06	1,08—1,23	25
NaF — Li	$(F_2^+)_A$	0,69	0,95—1,3	30
NaF	F_3	0,96	1,15—1,4	17

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник** по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1.

2. **Карлов Н. В.** Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1983.

3. **Handbook** of Lasers//Ed. by R. J. Pressley. Cleveland, Chemical Rubber Comp., 1971.

4. **Карлов Н. В.**//Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 8—11.

5. **Beck R., Englisch W., Gürs K.** Table of Laser Lines in Gases and Vapors. 3rd. Berlin — Heidelberg — N. Y.: Springer-Verlag, 1980. Vol. 2.

6. **Аблеков В. К., Денисов Ю. Н., Любченко Ф. Н.** Справочник по газодинамическим лазерам. М.: Машиностроение, 1982.

7. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

8. **Tittel F. K., Wilson W. L., Stickel R. E. e. a.**//Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 36. P. 405—413.

9. **Tittel F. K., Marowcky G., Wilson W. L., Williams R. A.**//Ibid. 1980. Vol. 37. P. 862—875.

10. **Каминский А. А., Мак А. А., Пашинин П. П.** и др.//Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 237—324.

11. **Жариков Е. В., Ильичев Н. Н., Лаптев В. В.** и др.//Квантовая электроника. 1983. Т. 10, № 1. С. 140—149.

12. **Walling John C.**//Laser Focus. 1982. Vol. 18, № 2. P. 45—50.

13. **Жариков Е. В., Ильичев Н. Н., Калитин С. П.** Препринт ФИАН № 20. М., 1983.

14. **Каминский А. А.** Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975.

15. **Klein P. B., Furneaux J. E., Henry R. L.**//Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 42, № 8. P. 638—640.

16. **Künzel W., Dürr U.**//Appl. Phys. 1982. Vol. 328, № 2—3. P. 233—234.

17. **Johnson L. F., Guggenheim H. J., Bahnch D.**// Opt. Lett. 1983. Vol. 8, № 7. P. 371—373.

18. **Ehrlich D. J., Moulton P. F., Osgoord R. M.**// Ibid. 1980. Vol. 5, № 8. P. 339—341.

19. **Ehrlich D. J.**//Top. Meet. Excim. Lasers. Digest Techn. Pap. Charleston, S. C. N. Y. 1979. P. Tn $A^4/_1$—Tn $A^4/_4$.

20. **Каминский А. А.**//Докл. АН СССР. 1983. Т. 271, № 6. С. 1357—1359.

21. **Allen P.**//Rare Earths Modern Science and Technology. N. Y. — Lond.: Plenum Press, 1978. P. 527—532.

22. **Hegarty J., Yen W. M.**//J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51, № 7. P. 3545—3547.

23. **Kaminskii A. A., Petrosyan A. G., Ovanesyan K. L.**//Phys. status solidi (a). 1983. Vol. 77. № 2. P. K 173—K 178.

24. **Kaminskii A. A., Asamalyan N. R., Denisenko G. A.**//Phys. status solidi, 1982. Vol. A. 70, № 2. P. 397—406.

25. **Каминский А. А.**//Изв. АН СССР. Сер. Неорг. матер. 1979. Т. 15, № 11. С. 2092.

26. **Lempicki A., McCollum B. C., Chinn S. R.**//IEEE J. Quant. Electr. 1979. Vol. 15, № 9. 896—903.

27. **Каминский А. А., Мнлль Б. В., Сильвестрова И. М.**//Изв. АН СССР. Сер. фнз. 1983. Т. 47, № 10. С. 1903—1909.

28. **Garmash W. M., Kaminskii A. A., Polyakov N. I.**// Phys. status solidi(a). 1983. Vol. 75, № 2. P. K111—K116.

29. **Каминскнй А. А., Тимофеева В. А., Агамалян Н. В.** и др.//Кристаллографня. 1982. Т. 27, № 3. С. 522—527.

30. **Budin J. P., Michel J. C., Auzel F.**//J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50, № 2. P. 641—645.

31. **Дианов Е. М., Дмитрук М. В., Карасик А. Я.**// Квантовая электроника 1980. Т. 7, № 10. С. 2105—2111.

32. **Каминский А. А., Кюрстен Г. Д., Шультце Д.** и др.//Докл. АН СССР. 1983. Т. 270, № 6. С. 1373—1376.

33. **Казаков Б. Н., Орлов М. С., Петров М. В. и др.**// Оптика и спектроскопия. 1979. Т. 47, № 6. С. 1217—1219.

34. **Каминский А. А., Петросян А. Г., Федоров В. А.** и др.//Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1981. Т. 17, № 10. С. 1920—1922.

35. **Kaminskii A. A., Sarkisov S. E., Butaeva T. I.** //Phys. status solidi. 1979. Vol. 56, № 2. P. 725—736.

36. **Каминский А. А., Федоров В. А., Петросян А. Г.** и др.//Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1979. Т. 15, № 8. С. 1494—1495.

37. **Каминский А. А.**//Докл. АН СССР. 1981. Т. 260, № 1. С. 64—67.

38. **Каминский А. А., Петросян А. Г., Ованесян К. Л.**//Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1983. Т. 119, № 7. С. 1217—1219.

39. **Cockaune B.**//J. Cryst. Crowth. 1981. Vol. 54, № 3. P. 407—413.

40. **Каминскнй А. А.**//Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1982. Т. 18, № 3. С. 482—497.

41. **Антипенко Б. М., Мак А. А., Синицын Б. В.** и др.//Журн. техн. физ. 1982. Т. 52, № 3. С. 521—522.

42. **Каминский А. А.**//Кристаллография. 1982. Т. 27, № 1. С. 193—195.

43. **Mochalow I. V.**//Phys status solidi (a). 1979. Vol. 55, № 1. P. 79—87.

44. **Каминский А. А., Петросян А. Г.**//Изв. АН СССР. Сер. неорг. матер. 1982. Т. 18, № 11. С. 1910—1911.

45. **Каминский А. А., Павлюк А. А., Бутаева Т. И.** и др.//Там же. 1979. Т. 15, № 3. С. 541—542.

46. **Каминский А. А., Павлюк А. А., Агапалян Н. Р.** и др.//Там же. Т. 15, № 8. С. 1496—1497.

47. **Каминский А. А., Саркисов С. Э., Сейтранян К. Б.** и др.//Там же. 1982. Т. 18, № 3. С. 527—528.

48. **Каминский А. А., Сейтранян К. Б., Аракелян А. З.** и др.//Там же. Т. 18, № 6, С. 1061—1063.

49. **Каминский А. А., Петросян А. Г.**//Там же. Т. 18, №11.С. 1910—1911.

50. **Каминский А. А.**//Там же. 1983. Т. 19, № 8. С. 1388—1391.

51. **Авакянц Л. И., Бужинский И. М., Корягина Е. И., Суркова В. Ф.**//Квантовая электроника. 1978. Т. 5, № 4. С. 725—752.

52. **Бужинский И. М., Дианов Е. М., Мак А. А.**// Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 329—334.

53. **Лазерные** фосфатные стекла/Н. Е. Алексеев, В. П. Гапонцев. М. Е. Жаботинский и др. М.: Наука, 1980.

54. **Елисеев П. Г.**//Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 334—342.

55. **Елисеев П. Г.** Полупроводниковые лазеры и преобразователи. М.: ВИНИТИ, 1978. (Итоги науки и техникн. Радиотехника. Т. 14, ч. 1.)

56. **Долгинов Л. М., Елисеев П. Г., Исманлов И.**/ Инжекционные излучательные приборы на основе многокомпонентных полупроводниковых твердых растворов. М.: ВИНИТИ, 1980. С. 3—115. (Итоги науки и техники. Раднотехника. Т. 21).

57. **Инжекционные** лазеры. М.: Наука, 1983. (Тр. ФИАН. Т. 141).

58. **Кейси Х., Панш М.** Лазеры на гетероструктурах: Пер. с англ./Под. ред. П. Г. Елисеева. М.: Мир, 1981. Т. 1, 2.

59. **Thompson G. H. B.** Physics of Semiconductor Laser Devices. Chichester — N. Y. — Brisbane — Toronto: John Wiley and Sons, 1980.

60. **Елисеев П. Г.**//Электронная промышленность. 1980. № 8—9. С. 50.

61. **Степанов Б. И., Рубинов А. Н., Мостовников В. А.**//Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. С. 360—379.

62. **Каталог** активных лазерных сред на основе растворов органических красителей и родственных соединений/Под ред. Б. И. Степанова. Минск: Ин-т физики АН БССР, 1977.

63. **Басиев Т. Т., Воронько Ю. К., Миров С. Б. и др.**//Изв. АН СССР, Сер. физ. 1982. Т. 46. С. 1600—1610.

64. **Феофилов П. П., Архангельская В. А.**//Там же. 1981. Т. 45. С. 302—308.

Глава 35
РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Р. М. Имамов

35.1. ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рентгеновским излучением называют электромагнитные колебания с длиной волны λ от 10^{-3} до 10 нм. Чрезвычайно малые длины волн рентгеновского излучения, сонзмеримые с межатомными расстояниями в твердых и жндкнх телах, обусловливают своеобразные свойства этого излучения. Показатель преломления рентгеновского излучения определяется выражением

$$q = 1 - e^2 N\lambda^2/(2mc^2\pi),$$

где N — чнсло электронов в 1 см^3; λ — длина волны, см; e и m — заряд и масса электрона.

Так как $e^2/(mc^2) = 2{,}8\cdot10^{-13}$ см, $\lambda^2 \approx 10^{-16}$ см, $N \approx \approx 10^{23} \div 10^{25}$ см^3, то порядок второго члена в выражении для q меньше 10^{-4}. Таким образом, для рентгеновского излучения q меньше единицы, хотя и мало отлнчается от нее.

Ввиду близости q к единице рентгеновское излучение фокусировать с помощью лннз и призм практнчески невозможно. В рентгеновской оптнке пучки формируют чаще всего с помощью диафрагм лнбо зеркал с полным внешним отражением. Используются также дифракционные методы фокусировки пучков.

Источником рентгеновского нзлучения служит электронная рентгеновская трубка. В ней электроны, испускаемые накаленным катодом (вольфрамовой нитью или спиралью), ускоряются электрическим полем н направляются на металлический анод. Энергия электронов при их резком торможении в веществе анода преобразуется в фотоны рентгеновского излучения:

$$E_{\text{Фотона}} = h\nu = E_1 - E_2,$$

где h — постоянная Планка; ν — частота излучения; E_1 и E_2 — энергия электронов соответственно до и после соударения с анодом. Возникающее нзлучение состоит обычно из тормозной и характеристической составляющих. Максимальная частота ν_{max} или минимальная длина волны λ_{min} соответствует полной остановке электронов ($E_2 = 0$):

$$h\nu_{max} = hc/\lambda_{min} = E_1 = eU,$$

где U — ускоряющее напряжение, кВ; $\lambda_{min} = 1{,}24/U$, нм.

Поскольку E_2 может принимать любое значение, меньшее E_1, то непрерывный спектр со стороны длинных волн ограничен лишь поглощеннем длинноволнового излучення в материале окна трубкн и в воздухе. Максимальной интенсивности в сплошном спектре соответствует длина волны спектра $\lambda \approx 1{,}5\,\lambda_{min}$.

В качестве мощного источника рентгеновского излучения в последнее время используют снихротронное, нли магнитотормозное, излучение, возникающее прн движении релятивистских заряженных частнц в однородном магнитном поле. Спектр синхротронного излучения практически непрерывно заполняет днапазон от нифракрасного до высокоэнергетического рентгеновского излучения. Направление нзлучения совпадает с мгновенной скоростью заряженной частнцы и сосредоточено в конусе с углом раствора $\theta \approx E/(mc^2)$, где E — энергия заряженной частнцы, m — ее масса, c — скорость света.

Для измерения энергни рентгеновского излучения согласно РД 50-454—84 рекомендуется применять внесистемную единнцу электрон-вольт. В соответствни с ГОСТ 8.417—81 единица электрон-вольт и десятичные кратные ей единицы допускаются к применению без ограничения срока наравне с единицами СИ:

$$\lambda = \frac{1}{\tilde{\nu}} = hc/E;$$

$$E(\lambda = 1 \text{ нм}) = hc/10^{-9} \text{ м} = 1239{,}851\,9\,(32) \text{ эВ};$$

$$\lambda(E = 1 \text{ эВ}) = hc/1 \text{ эВ} = 1239{,}851\,9\,(32) \text{ нм}.$$

Ниже приведены соотношения между рекомендованными и внесистемными единицами:

$$1\,kX = 0{,}100202 \text{ нм};$$

$$1 \text{ Ry} = 13{,}605802 \text{ эВ};$$

$$\tilde{\nu}(E = 1 \text{ эВ}) = 1 \text{ эВ}/hc = 8065{,}479 \text{ см}^{-1}.$$

35.2. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЙ СПЕКТР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Характеристический спектр возникает при определенном ускоряющем напряжении U, зависящем от атомного номера Z материала анода. Появление характеристического спектра легко объяснить на основании квантовомеханических представленнй о строенин атома.

Ускоренные в трубке электроны могут «выбить» тот или иной внутренний электрон атома анода. Возникновение электронной вакансии переводит атом в возбужденное состояние. Возвращение атома в невозбужденное состояние сопровождается выделением избытка энергии в виде кванта рентгеновского излучения $h\nu = E_1 - E_0$, где E_1 — энергия электронов внешних оболочек, а E_0 — энергия электронов внутренних оболочек.

В рентгеновской спектроскопии прнняты следующие

обозначения [1]. Термы уровней атома, для которых главное квантовое число равно 1, 2, 3, 4, 5 и 6, обозначаются соответственно буквами *K*, *L*, *M*, *N*, *O*, *P*. Индексы у этих букв соответствуют разным значениям орбитального и полного момента электрона согласно схеме:

Уровень электрона в атоме	1s	2s	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	3s	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{5/2}$	и т. д.
Терм уровня	K	L_{I}	L_{II}	L_{III}	M_{I}	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_{V}	и т. д.

Линии, соответствующие переходам электрона в атоме на *K*-, *L*-, *M*-, *N*-оболочки, образуют *K*-, *L*-, *M*-, *N*-серии рентгеновского излучения. Линии, возникающие при переходах по такой простой диаграмме уровней, называют диаграммными линиями.

Частота какой-либо линии ν, Гц, изменяется при переходе от одного элемента к другому по закону Мозли:

$$\nu \approx R_\infty c (Z-\sigma)^2 \left(n_0^{-2} - n_1^{-2}\right),$$

где $R_\infty = 109737{,}3$ см$^{-1}$ — постоянная Ридберга; c — скорость света; n — главное квантовое число (здесь индекс 0 относится к конечному, а 1 — к исходному состоянию электрона); σ — постоянная экранирования.

При постоянном анодном токе интенсивность характеристического излучения I_c растет пропорционально $(U-U_{\text{кр}})^{3/2}/U$, где $U_{\text{кр}}$ — порог возбуждения линии. Максимум отношения интенсивности характеристического излучения к интенсивности сплошного спектра достигается при $U = 3\,U_{\text{кр}}$.

Таблица 35.1. **Обозначение диаграммных линий рентгеновского излучения [2]**

K-серия		*L*-серия				*M*-серия	
Переход	Индекс линии	Переход	Индекс линии	Переход	Индекс линии	Переход	Индекс линии
$K-L_{\text{II}}$	α_2	$L-M_{\text{II}}$	β_4	$L_{\text{II}}-O_{\text{IV}}$	γ_6	$M_{\text{III}}-N_{\text{V}}$	γ
$K-L_{\text{III}}$	α_1	$L_{\text{I}}-M_{\text{III}}$	β_3	$L_{\text{III}}-M_{\text{I}}$	l	$M_{\text{IV}}-N_{\text{III}}$	δ
$K-M_{\text{II}}$	β_3	$L_{\text{I}}-M_{\text{IV}}$	β_{10}	$L_{\text{III}}-M_{\text{II}}$	—	$M_{\text{IV}}-N_{\text{VI, V, II}}$	β
$K-M_{\text{III}}$	β_1	$L_{\text{I}}-M_{\text{V}}$	β_9	$L_{\text{III}}-M_{\text{III}}$	s	$M_{\text{IV}}-O_{\text{II}}, O_{\text{III}}$	η
$K-M_{\text{IV}}$	β_5^{II}	$L_{\text{I}}-N_{\text{II}}$	γ_2	$L_{\text{III}}-M_{\text{IV}}$	α_2	$M_{\text{V}}-N_{\text{II}}$	ξ_1
$K-M_{\text{V}}$	β_5^{I}	$L_{\text{I}}-N_{\text{III}}$	γ_3			$M_{\text{V}}-N_{\text{III}}$	ξ_2
$K-M_{\text{IV, V}}$	β_5	$L_{\text{I}}-O_{\text{II}}$	γ_4'	$L_{\text{III}}-M_{\text{V}}$	α_1	$M_{\text{V}}-N_{\text{II, III}}$	ξ
$K-N_{\text{II}}$	β_2^{II}	$L_{\text{I}}-O_{\text{III}}$	γ_4	$L_{\text{III}}-N_{\text{I}}$	β_6	$M_{\text{V}}-N_{\text{VI}}$	α_2
		$L_{\text{I}}-P_{\text{II, III}}$	γ_{13}			$M_{\text{V}}-N_{\text{VII}}$	α_1
$K-N_{\text{III}}$	β_2^{I}	$L_{\text{II}}-M_{\text{I}}$	η	$L_{\text{III}}-N_{\text{IV}}$	β_{15}		
$K-N_{\text{II, III}}$	β_2	$L_{\text{II}}-M_{\text{IV}}$	β_1	$L_{\text{III}}-N_{\text{V}}$	β_2		
$K-N_{\text{IV}}$	β_{4x}	$L_{\text{II}}-N_{\text{I}}$	γ_5	$L_{\text{III}}-N_{\text{VI, VII}}$	β_7'		
$K-N_{\text{V}}$	β_4	$L_{\text{II}}-N_{\text{IV}}$	γ_1	$L_{\text{III}}-O_{\text{I}}$	β_7		
		$L_{\text{II}}-O_{\text{I}}$	γ_8	$L_{\text{III}}-O_{\text{IV, V}}$	β_5		

35.3 ДЛИНА ВОЛНЫ ОСНОВНЫХ ЛИНИЙ И КРАЕВ ПОГЛОЩЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Таблица 35.2 **Длина волны диаграммных линий [3] при начальном уровне K**

Элемент	Длина волны λ, нм, при конечном уровне							Край поглощения
	L_{I}	L_{II}	L_{III}	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_{V}	
	—	α_2	α_1	β_3	β_1	β_5^{II}	β_5^{I}	
^{3}Li	—	22,8		—		—		22,65
^{4}Be	—	11,4		—		—		11,10
^{5}B	—	6,76		—		—		—
^{6}C	—	4,47		—		—		4,368
^{7}N	—	3,16		—		—		3,099
^{8}O	—	2,362		—		—		2,332
^{9}F	—	1,832		—		—		1,800
^{10}Ne	—	1,461		1,445		—		1,430
^{11}Na	—	1,1910		1,1575		—		1,1569
^{12}Mg	—	0,9890		0,9521		—		0,9512
^{13}Al	—	0,8342	0,8339	0,7961		—		0,7948
^{14}Si	—	0,7128	0,7125	0,6753		—		0,6738
^{15}P	—	0,6160	0,6157	0,5796		—		0,5784
^{16}S	—	0,5375	0,5372	0,5032		—		0,5019
^{17}Cl	—	0,4731	0,4728	0,4403		—		0,4397
^{18}Ar	—	0,4195	0,4192	0,3886		—		0,3871
^{19}K	—	0,3745	0,3741	0,3454		0,3441		0,3437
^{20}Ca	—	0,3362	0,3358	0,3090		0,3075		0,3070
^{21}Sc	—	0,3034	0,3031	0,2780		0,2763		0,2762
^{22}Ti	—	0,2752	0,2749	0,2514		0,2499		0,2497
^{23}V	—	0,2507	0,2504	0,2284		0,2270		0,2269
^{24}Cr	—	0,2294	0,2290	0,2085		0,2071		0,2070
^{25}Mn	—	0,2106	0,2102	0,1910		0,1897		0,1896
^{26}Fe	—	0,1940	0,1936	0,1757		0,1744		0,1743
^{27}Co	—	0,1793	0,1789	0,1621		0,1609		0,1608
^{28}Ni	—	0,1662	0,1658	0,1500		0,1489		0,1488
^{29}Cu	—	0,1544	0,1541	0,1392		0,1382		0,1381
^{30}Zn	—	0,1439	0,1435	0,1295		0,1285		0,1283
^{31}Ga	—	0,1344	0,1340	0,1208	0,1207	0,1198		0,1196
^{32}Ge	—	0,1258	0,1254	0,1129	0,1128	0,1119		0,1117
^{33}As	—	0,1180	0,1176	0,1058	0,1057	0,1049		0,1045
^{34}Se	—	0,1109	0,1105	0,0993	0,0992	0,0984		0,0980
^{35}Br	—	0,1044	0,1040	0,0933	0,0932	0,0926		0,0920
^{36}Kr	—	0,0984	0,0980	0,0879	0,0878	0,0871		0,0866
^{37}Rb	—	0,0930	0,0926	0,0829	0,0828	0,0822		0,0816
^{38}Sr	—	0,0879	0,0875	0,0783	0,0782	0,0776		0,0770
^{39}Y	—	0,0833	0,0829	0,0741	0,0740	0,0735		0,0728
^{40}Zr	—	0,0790	0,0786	0,0702	0,0701	0,0696		0,0689
^{41}Nb	—	0,0750	0,0746	0,0666	0,0665	0,0660		0,0653
^{42}Mo	—	0,0714	0,0709	0,0633	0,0632	0,0627		0,0620
^{43}Tc	—	0,0679	0,0675	0,0602	0,0601	—		0,0589
^{44}Ru	—	0,0647	0,0643	0,0573	0,0572	0,0568		0,0561
^{45}Rh	—	0,0618	0,0613	0,0546	0,0545	0,0541		0,0534
^{46}Pd	—	0,0590	0,0585	0,0521	0,0520	0,0516		0,0509
^{47}Ag	—	0,0564	0,0559	0,0498	0,0497	0,0493		0,0486
^{48}Cd	—	0,0539	0,0535	0,0476	0,0475	0,0471		0,0464
^{49}In	—	0,0516	0,0512	0,0455	0,0454	0,0451		0,0444
^{50}Sn	—	0,0495	0,0491	0,0436	0,0435	0,0432		0,0425
^{51}Sb	—	0,0475	0,0470	0,0418	0,0417	0,0414		0,0407
^{52}Te	—	0,0456	0,0451	0,0401	0,0400	—		0,0390
^{53}I	—	0,0438	0,0433	0,0385	0,0384	—		0,0374
^{54}Xe	—	0,0421	0,0416	0,0369	0,0368	—		0,0358
^{55}Cs	—	0,0405	0,0400	0,0355	0,0354	—		0,0345
^{56}Ba	—	0,0390	0,0385	0,0342	0,0341	0,0338		0,0331
^{57}La	—	0,0375	0,0371	0,0329	0,0328	0,0325		0,0318
^{58}Ce	—	0,0362	0,0357	0,0317	0,0316	0,0313		0,0306
^{59}Pr	—	0,0349	0,0344	0,0305	0,0304	—		0,0295
^{60}Nd	—	0,0336	0,0332	0,0294	0,0293	—		0,0285
^{61}Pm	—	0,0325	0,0320	0,0284	0,0283	—		0,0274
^{62}Sm	—	0,0314	0,0309	0,0274	0,0273	0,0271		0,0265

Элемент	Длина волны λ, нм, при конечном уровне							Край поглощения
	L_I	L_{II}	L_{III}	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	
	—	α_2	α_1	β_6	β_4	β_5^{II}	β_5^{I}	
^{63}Eu	—	0,0303	0,0298	0,0264	0,0263	—		0,0256
^{64}Gd	—	0,0293	0,0288	0,0255	0,0254	0,0243		0,0247
^{65}Tb	—	0,0283	0,0279	0,0247	0,0246	—		0,0238
^{66}Dy	—	0,0274	0,0269	0,0239	0,0238	0,0236		0,0230
^{67}Ho	—	0,0265	0,0261	0,0231	0,0230	0,0228		0,0223
^{68}Er	—	0,0257	0,0252	0,0223	0,0222	0,0221		0,0216
^{69}Tm	—	0,0249	0,0244	0,0216	0,0215	0,0214		0,0209
^{70}Yb	—	0,0241	0,0237	0,0209	0,0208	0,0207		0,0202
^{71}Lu	—	0,0234	0,0229	0,0203	0,0202	0,0200		0,0196
^{72}Hf	—	0,0227	0,0222	0,0197	0,0196	—		0,0190
^{73}Ta	—	0,0220	0,0215	0,0191	0,0190	0,0188		0,0184
^{74}W	0,0216	0,0214	0,0209	0,0185	0,0184	0,0183		0,0178
^{75}Re	—	0,0208	0,0203	0,0179	0,0178	0,0177		0,0173
^{76}Os	—	0,0202	0,0197	0,0174	0,0173	0,0172		0,0168
^{77}Ir	—	0,0196	0,0191	0,0169	0,0168	0,0167		0,0163
^{78}Pt	—	0,0190	0,0186	0,0164	0,0163	0,0162		0,0158
^{79}Au	—	0,0185	0,0180	0,0159	0,0158	0,0158		0,0154
^{80}Hg	—	0,0180	0,0175	0,0155	0,0154	0,0153		0,0149
^{81}Tl	—	0,0175	0,0170	0,0151	0,0150	0,0149		0,0145
^{82}Pb	—	0,0170	0,0165	0,0146	0,0145	0,0145		0,0141
^{83}Bi	—	0,0166	0,0161	0,0142	0,0141	0,0141		0,0137
^{84}Po	—	0,0161	0,0156	0,0139	0,0138	—		—
^{85}At	—	0,0157	0,0152	0,0135	0,0134	—		—
^{86}Kn	—	0,0153	0,0148	0,0131	0,0130	—		—
^{87}Er	—	0,0149	0,0144	0,0128	0,0127	—		—
^{88}Ra	—	0,0145	0,0140	0,0124	0,0123	—		—
^{89}Ac	—	0,0141	0,0136	0,0121	0,0120	—		—
^{90}Th	—	0,0138	0,0133	0,0118	0,0117	0,0116		0,0113
^{91}Pa	—	0,0134	0,0129	0,0115	0,0114	—		—
^{92}U	—	0,0131	0,0126	0,0112	0,0111	0,0110		0,0107

Таблица 35.3. **Длина волны λ, нм, *L*-серии диаграммных линий [3]**

Элемент	Начальный уровень L_I			L_I-край поглощения	Начальный уровень L_{II}		L_{II}-край поглощения	Начальный уровень L_{III}		L_{III}-край поглощения
	Конечный уровень				Конечный уровень			Конечный уровень		
	$L_{II, III}$	M_{II}	M_{III}		M_I	M_{IV}		M_I	$M_{IV, V}$	
	—	β_4	β_3		γ_1	β_1		l	$\alpha_{1,2}$	
^{11}Na	37,6	—	—	—	40,71		40,50	40,71		40,50
^{12}Mg	31,7	—	—	19,37	25,15		24,93	25,15		25,07
^{13}Al	29,0	—	—	14,25	17,14		17,04	17,14		17,04
^{14}Si	—	—	—	—	13,53		12,30	13,55		12,30
^{15}P	—	—	—	—	10,38		9,40	10,38		9,40
^{16}S	—	—	—	—	8,340	—	—	8,340	—	—
^{17}Cl	—	—	—	—	6,733	—	—	6,790	—	—
^{18}Ar	—	—	—	—	5,590	—	—	5,630	—	—
^{19}K	—	—	—	—	4,724	—	4,210	4,774	—	4,210
^{20}Ca	—	—	—	—	4,046	3,594	3,513	4,096	3,633	3,549
^{21}Sc	—	—	—	—	3,513	3,102	—	3,559	3,135	—
^{22}Ti	—	—	—	—	3,089	2,705	2,729	3,136	2,742	2,729
^{23}V	—	2,189	—	—	2,734	2,388	—	2,777	2,425	—
^{24}Cr	—	1,943	—	1,67	2,430	2,127	1,790	2,478	2,164	2,070
^{25}Mg	—	1,758	—	—	2,185	1,911	—	2,229	1,945	—
^{26}Fe	—	1,570	—	—	1,975	1,726	1,720	2,015	1,759	1,753
^{27}Co	—	1,427	—	—	1,787	1,567	1,562	1,829	1,597	1,592
^{28}Ni	—	1,316	—	—	1,627	1,427	1,424	1,669	1,456	1,453

Элемент	Начальный уровень L_I			L_I-край поглощения	Начальный уровень L_{II}		L_{II}-край поглощения	Начальный уровень L_{III}		L_{III}-край поглощения
	Конечный уровень				Конечный уровень			Конечный уровень		
	$L_{II,\ III}$	M_{II}	M_{III}		M_I	M_{IV}		M_I	$M_{IV,\ V}$	
	—	β_4	β_3		γ_1	β_1		l	$\alpha_{1,2}$	
^{29}Cu	—	1,210		—	1,490	1,305	1,301	1,525	1,334	1,329
^{30}Zn	—	1,119		1,306	1,368	1,198	1,186	1,402	1,225	1,213
^{31}Ga	—	1,037		0,952	1,260	1,102	1,083	1,295	1,129	1,110
^{32}Ge	—	0,964	0,958	0,877	1,161	1,018	0,992	1,194	1,044	1,019
^{33}As	—	0,893		0,811	1,073	0,941	0,913	1,107	0,967	0,937
^{34}Se	—	0,832		0,750	0,996	0,874	0,841	1,029	0,899	0,865
^{35}Br	—	0,777		0,696	0,926	0,813	0,775	0,959	0,837	0,798
^{36}Kr	—	0,730	0,726	0,647	—	0,758	0,717	—	0,782	0,739
^{37}Rb	—	0,682	0,679	0,601	0,804	0,708	0,664	0,836	0,732	0,686
^{38}Sr	—	0,640	0,637	0,559	0,752	0,662	0,617	0,784	0,687	0,639
^{39}Y	—	0,602	0,598	0,522	0,704	0,621	0,576	0,736	0,645	0,596
^{40}Zr	—	0,567	0,563	0,488	0,661	0,584	0,538	0,692	0,607	0,558
^{41}Nb	—	0,535	0,531	0,458	0,621	0,549	0,503	0,652	0,573	0,523
^{42}Mo	—	0,505	0,501	0,430	0,585	0,518	0,472	0,615	0,541	0,491
^{43}Tc	—	—	—	0,406	—	0,489	0,444	—	0,511	0,463
^{44}Ru	—	0,452	0,449	0,384	0,521	0,462	0,418	0,550	0,485	0,437
^{45}Rh	—	0,429	0,425	0,363	0,492	0,437	0,394	0,522	0,460	0,413
^{46}Pd	—	0,407	0,403	0,344	0,466	0,415	0,372	0,495	0,437	0,391
^{47}Ag	—	0,387	0,383	0,326	0,442	0,393	0,353	0,471	0,415	0,370
^{48}Cd	—	0,368	0,364	0,308	0,419	0,374	0,333	0,448	0,396	0,350
^{49}In	—	0,351	0,347	0,293	0,398	0,356	0,315	0,427	0,377	0,332
^{50}Sn	—	0,334	0,341	0,278	0,379	0,339	0,298	0,407	0,360	0,316
^{51}Sb	—	0,319	0,315	0,264	0,361	0,323	0,283	0,389	0,344	0,300
^{52}Te	—	0,305	0,301	0,251	0,344	0,308	0,269	0,372	0,329	0,286
^{53}I	—	0,291	0,287	0,239	0,328	0,294	0,255	0,356	0,315	0,272
^{54}Xe	—	—	—	0,227	—	—	0,243	—	0,302	0,259
^{55}Cs	—	0,266	0,263	0,217	0,299	0,268	0,231	0,327	0,289	0,247
^{56}Ba	—	0,256	0,252	0,207	0,286	0,257	0,220	0,314	0,278	0,236
^{57}La	—	0,245	0,241	0,198	0,274	0,246	0,211	0,301	0,267	0,226
^{58}Ce	—	0,235	0,231	0,189	0,262	0,236	0,201	0,289	0,256	0,217
^{59}Pr	—	0,226	0,222	0,181	0,251	0,226	0,193	0,278	0,246	0,208
^{60}Nd	—	0,217	0,213	0,174	0,241	0,217	0,184	0,268	0,237	0,200
^{61}Pm	—	—	0,204	0,167	—	0,208	0,177	—	0,228	0,192
^{62}Sm	—	0,200	0,196	0,160	0,222	0,200	0,169	0,248	0,220	0,185
^{63}Eu	—	0,193	0,189	0,154	0,213	0,192	0,163	0,239	0,212	0,178
^{64}Gd	—	0,185	0,182	0,148	0,205	0,185	0,156	0,231	0,205	0,171
^{65}Tb	—	0,179	0,175	0,142	0,197	0,178	0,150	0,224	0,198	0,165
^{66}Dy	—	0,172	0,168	0,137	0,190	0,171	0,144	0,216	0,191	0,159
^{67}Ho	—	0,166	0,162	0,132	0,183	0,165	0,139	0,209	0,185	0,154
^{68}Er	—	0,160	0,156	0,127	0,176	0,159	0,134	0,202	0,179	0,148
^{69}Tm	—	0,154	0,151	0,123	0,170	0,153	0,129	0,196	0,173	0,143
^{70}Yb	—	0,149	0,145	0,118	0,164	0,148	0,124	0,189	0,168	0,139
^{71}Lu	—	0,144	0,140	0,114	0,158	0,142	0,120	0,184	0,163	0,134
^{72}Hf	—	0,139	0,135	0,110	0,152	0,137	0,115	0,178	0,158	0,130
^{73}Ta	—	0,135	0,131	0,106	0,147	0,132	0,111	0,173	0,153	0,126
^{74}W	—	0,130	0,126	0,102	0,142	0,128	0,107	0,169	0,148	0,122
^{75}Re	—	0,126	0,122	0,099	0,137	0,124	0,104	0,163	0,144	0,118
^{76}Os	—	0,122	0,118	0,096	0,133	0,119	0,100	0,158	0,140	0,114
^{77}Ir	—	0,118	0,114	0,092	0,128	0,116	0,097	0,154	0,136	0,111
^{78}Pt	—	0,114	0,110	0,089	0,124	0,112	0,093	0,150	0,132	0,107
^{79}Au	—	0,111	0,107	0,086	0,120	0,108	0,090	0,146	0,128	0,104
^{80}Hg	—	0,107	0,103	0,084	0,116	0,105	0,087	0,142	0,125	0,101
^{81}Tl	—	0,104	0,100	0,081	0,113	0,101	0,084	0,138	0,121	0,098
^{82}Pb	—	0,101	0,097	0,078	0,109	0,098	0,082	0,135	0,118	0,095
^{83}Bi	—	0,098	0,094	0,076	0,106	0,095	0,079	0,132	0,115	0,092
^{84}Po	—	0,097	0,091	—	—	0,092	—	0,128	0,112	—
^{85}At	—	—	0,088	—	—	0,089	—	—	0,109	—
^{86}Rn	—	—	0,085	—	—	0,087	—	—	0,106	—
^{87}Er	—	—	0,083	—	—	0,084	—	—	0,104	—

Продолжение табл. 35.3

Элемент	Начальный уровень L_I			L_I-край поглощения	Начальный уровень L_{II}		L_{II}-край поглощения	Начальный уровень L_{III}		L_{III}-край поглощения
	Конечный уровень				Конечный уровень			Конечный уровень		
	$L_{II, III}$	M_{II}	M_{III}		M_I	M_{IV}		M_I	$M_{IV, V}$	
	—	β_4	β_3		η	β_1		l	$\alpha_{1,2}$	
^{88}Ra	—	0,084	0,080	0,065	0,091	0,081	0,067	0,117	0,101	0,080
^{89}Ac	—	—	0,078	—	—	0,079	—	—	0,099	—
^{90}Th	—	0,079	0,075	0,061	0,085	0,077	0,063	0,112	0,096	0,076
^{91}Pa	—	0,077	0,073	—	0,083	0,074	—	0,109	0,094	—
^{92}U	—	0,075	0,071	0,057	0,081	0,072	0,059	0,107	0,092	0,072
^{93}Np	—	0,073	0,069	—	0,078	0,070	—	0,104	0,090	—
^{94}Pu	—	0,071	0,067	0,054	0,076	0,068	0,056	0,102	0,088	0,069
^{95}Am	—	0,069	0,065	—	—	0,066	—	0,100	0,086	—

35.4. ШИРИНА ЛИНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В соответствии с принципом неопределенности энергетические уровни (термы) имеют конечную ширину. Это приводит к наличию некоторого «разбега» по энергиям у квантов одной и той же спектральной линии. Для самой линии характерна конечная ширина, соизмеримая с междублетным расстоянием. Значения ширины ярких линий на половине высоты приведены в табл. 35.4. Это величины непосредственно определяются шириной валентной зоны.

Таблица 35.4. **Значения ширины ярких линий рентгеновского излучения на половине высоты $\Delta\lambda$, нм [3]**

Элемент	K-линия начального уровня				L-линия начального уровня		M-линия начального уровня
	α_1	α_2	β_1	β_3	α	β	ξ
^{22}Ti	1,38	1,90	—	—	—	—	—
^{23}V	1,58	2,21	—	—	—	—	—
^{24}Cr	1,96	2,43	—	—	—	—	—
^{25}Mn	2,46	2,96	—	—	—	—	—
^{26}Fe	2,65	3,00	—	—	—	—	—
^{27}Co	2,45	3,12	—	—	—	—	—
^{28}Ni	2,26	3,03	—	—	—	—	—
^{29}Cu	2,31	3,21	—	—	—	—	—
^{30}Zn	2,44	2,90	—	—	—	—	—
^{31}Ga	2,10	2,55	—	—	—	—	—
^{32}Ge	2,73	2,94	—	—	—	—	—
^{38}Sr	4,5	4,6	—	—	—	—	1,52
^{39}Y	—	—	—	—	—	—	0,44
^{40}Zr	5,2	5,4	—	—	1,94	1,97	0,827
^{41}Nb	5,8	5,4	—	—	1,94	2,12	1,24
^{42}Mo	5,86	6,18	—	—	1,95	2,21	1,63
^{44}Ru	6,8	6,7	—	—	2,55	2,83	2,49
^{45}Rh	7,3	7,2	—	—	2,54	2,87	3,77
^{46}Rd	7,8	7,9	—	—	2,94	2,97	7,26
^{47}Ag	8,6	8,7	—	—	3,16	2,74	10,24
^{48}Cd	—	—	—	—	2,81	3,50	—
^{50}Sn	—	—	11,7	11,5	—	—	—

Продолжение табл. 35.4

Элемент	K-линия начального уровня				L-линия начального уровня		M-линия начального уровня
	α_1	α_2	β_3	β_2	α	β	ξ
^{51}Sb	10,6	14,2	—	—	—	—	—
^{52}Te	11,0	14,0	—	—	—	—	—
^{53}I	10,7	15,1	—	—	—	—	—
^{55}Cs	15,0	15,1	17,7	14,6	—	—	—
^{56}Ba	15,2	18,0	—	—	—	—	—
^{57}La	—	17,2	—	—	—	—	—
^{58}Ce	12,8	17,0	18,8	17,3	—	—	—
^{60}Nd	14,4	21,2	—	—	—	—	—
^{62}Sm	23,9	24,2	27,5	24,7	—	—	—
^{63}Eu	—	22,2	—	—	—	—	—
^{64}Gd	27,0	26,4	—	—	—	—	—
^{65}Tb	—	24,6	33,2	33,0	—	—	—
^{66}Dy	27,9	26,1	—	—	—	—	—
^{67}Ho	30,2	28,8	33,5	34,0	—	—	—
^{68}Fr	—	29,5	—	—	—	—	—
^{69}Tm	—	36,9	—	—	—	—	—
^{70}Yb	40,4	32,5	44,0	37,8	—	—	—
^{71}Lu	39,3	39,8	—	—	—	—	—
^{72}Hf	—	38,7	—	—	—	—	—
^{73}Ta	42,4	36,4	44,9	49,3	—	—	—
^{74}W	43,2	37,4	—	—	—	—	—
^{75}Re	46,4	52,9	—	—	—	—	—
^{76}Os	55,0	50,9	—	—	—	—	—
^{77}Ir	53,0	50,3	—	—	—	—	—
^{78}Pt	58,0	63,3	—	—	—	—	—
^{79}Au	55,5	56,7	—	—	—	—	—
^{80}Hg	64,0	68,5	—	—	—	—	—
^{81}Tl	—	78,2	—	—	—	—	—
^{82}Pb	65,5	68,7	—	—	—	—	—
^{83}Bi	—	83,5	—	—	—	—	—
^{90}Th	95,0	92,6	—	—	—	—	—
^{92}U	105,0	107,5	—	—	—	—	—
^{93}Np	98,5	103,9	—	—	—	—	—
^{94}Pu	—	114,0	—	—	—	—	—
^{95}Am	115,0	129,5	—	—	—	—	—

Таблица 35.5. **Относительная интенсивность линий K- и L-серий (в процентах интенсивности соответственно $K_{\alpha 1}$-линий, для Ar — Ca — от дублета $K_{\alpha 1} + K_{\alpha 2}$ и $L_{\alpha 1}$-линий, для K—Co—от дублета $L_{\alpha 1} + L_{\alpha 2}$)**

Элемент	K-Серия					L-Серия				
	α_2	β_3	β_1	β_5	β_2	α_1	α_2	l	β_6	$\beta_{2,15}$
^{18}Ar	—	—	10,3		—	—	—	—	—	—
^{19}K	—	—	12,2		—	—	—	—	—	—
^{20}Ca	—	—	12,8		—	100		250	—	—
^{21}Sc	50,7	—	20,0		—	100		250	—	—
^{22}Ti	50,2	—	19,8	0,44	—	100		165	—	—
^{23}V	50,7	—	20,5	0,45	—	100		250	—	—
^{24}Cr	50,5	—	17,9	0,43	—	100		77	—	—
^{25}Mn	50,0	—	22,4	0,34	—	100		100	—	—
^{26}Fe	50,6	—	16,7	0,21	—	100		80	—	—
^{27}Co	50,2	—	16,0	0,14	—	100		75	—	—
^{28}Ni	50,7	—	18,7	0,20	—	—	—	—	—	—
^{29}Cu	50,7	—	20,0	0,15	—	—	—	—	—	—
^{30}Zn	51,3	—	20,7	—	0,36	—	—	—	—	—
^{31}Ga	50,7	—	21,6	—	—	—	—	—	—	—
^{32}Ge	51,2	—	24,0	—	1,32	—	—	—	—	—
^{33}As	43,2	—	21,7	—	0,69	—	—	—	—	—
^{34}Se	52,3	—	21,0	—	1,07	—	—	—	—	—
^{35}Br	50,9	—	22,2	—	1,73	—	—	—	—	—
^{36}Kr	—	—	17,2	—	—	—	—	—	—	—
^{37}Rb	51,0		23,9	—	2,5	—	—	—	—	—
^{38}Sr	52,1		27,4	—	4,16	—	—	—	—	—
^{39}X	52,3		23,3	—	3,19	—	—	—	—	—
^{40}Zr	52,4		24,9	—	3,70	100	12,0	3,5	0,6	2,0
^{41}Nb	52,6		27,9		4,90	100	14,0	4,0	0,7	4,7
^{42}Mo	52,5		26,5	—	4,30	100	11,0	2,4	—	5,6
^{44}Ru	51,1		29,3	—	5,63	100	—	—	—	10,7
^{45}Rh	52,5		27,6	—	4,60	100	—	—	—	15,2
^{46}Pd	52,6		29,0	—	6,13	100	—	—	—	16,8
^{47}Ag	52,2		28,4	—	4,9	100	—	—	—	25,8
^{48}Cd	54,4		29,7	—	6,42	100	—	—	—	36,0
^{49}In	53,9		29,6	—	6,47	100	—	—	—	25,2
^{50}Sn	54,1		29,8	—	5,5	100	—	—	—	27,9
^{51}Sb	51,7		31,0	—	7,08	100	—	—	—	26,5
^{52}Te	52,7		30,6	—	7,35	—	—	—	—	—
^{53}I	53,6		30,1	—	6,0	—	—	—	—	—
^{55}Cs	54,0		—	—	—	—	—	—	—	—
^{56}Ba	56,2		30,4	—	7,1	—	—	—	—	—
^{57}La	56,4		—	—	—	100	11,4	—	—	21,2
^{58}Ce	50,8		30,3	—	8,0	100	9,8	4,7	—	22,4
^{59}Pr	53,0		—	—	—	—	11,0	—	—	20,4
^{60}Nd	53,2		—	—	—	100	10,4	—	—	22,5
^{62}Sm	54,0		32,1	—	7,5	100	8,5	4,8	0,66	21,7
^{63}Eu	54,9		—	—	—	—	—	—	—	—
^{64}Gd	56,9		31,0	—	8,7	100	12,5	5,2	—	19,8
^{65}Tb	56,2		—	—	—	100	11,5	2,64	—	19,8
^{66}Dy	55,1		—	—	—	100	10,3	—	—	19,6
^{67}Ho	56,0		32,0	—	8,8	100	11,6	5,5	0,57	17,7
^{68}Er	52,2		—	—	—	100	11,5	—	—	19,6
^{69}Tm	57,6		—	—	—	100	11,3	3,11	1,08	15,0
^{70}Yb	58,7		32,7	—	8,9	100	11,9	—	—	22,0
^{71}Lu	58,5		—	—	—	100	11,7	3,48	—	17,9
^{72}Hf	57,1		—	—	—	100	11,6	3,06	—	19,2
^{73}Ta	55,4	12,5	24,3	0,57	7,8	100	12,0	5,7	1,2	20,2
^{74}W	57,8	13,3	24,8	0,56	8,5	100	11,7	3,38	1,2	22,2
^{75}Re	58,7	12,8	24,6	0,57	8,5	100	11,7	—	1,8	21,4
^{76}Os	60,2	12,9	25,0	0,69	8,9	100	11,1	—	—	26,9
^{77}Ir	57,7	12,7	24,3	0,64	7,8	100	11,5	6,0	1,4	23,8
^{78}Pt	56,3	12,9	24,6	0,69	9,0	100	11,8	—	1,5	23,2
^{79}Au	58,5	13,2	25,8	0,77	8,8	100	11,5	6,0	1,3	25,9
^{80}Hg	59,5	13,1	26,6	0,72	10,0	100	11,0	—	1,3	22,9
^{81}Tl	57,4	13,9	25,7	0,65	10,1	100	10,5	—	1,7	26,8
^{82}Pb	59,6	14,0	26,2	0,74	10,0	100	11,9	4,1	1,7	24,0

Продолжение табл. 35.5

Элемент	K-Серия					L-Серия				
	α_2	β_3	β_1	β_5	β_2	α_1	α_2	l	β_6	$\beta_{2,15}$
^{83}Bi	59,9	13,4	26,8	0,80	10,0	100	11,3	6,3	1,8	24,0
^{90}Tn	61,0	14,0	28,4	0,98	11,8	100	10,7	7,2	1,9	28,4
^{91}Pa	—	—	—	—	—	100	10,9	—	—	24,0
^{92}U	61,0	14,0	27,8	0,98	12,0	100	10,6	4,5	1,7	26,8
^{93}Np	63,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
^{94}Pu	63,0	—	—	—	—	100	10,2	—	1,7	24,9
^{95}Am	61,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
^{96}Cm	63,2	11,2	23,0	—	—	—	—	—	—	—
^{97}Bk	64,3	12,6	22,2	—	—	—	—	—	—	—
^{98}Cf	65,7	13,3	25,9	—	—	—	—	—	—	—
^{99}Es	66,6	13,4	24,2	—	—	—	—	—	—	—

35.5. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИЙ

Интенсивность линий рентгеновского излучения определяется силой осциллятора и частотой соответствующего перехода, а также статистическим весом уровня атома. Вычисление сил осцилляторов представляет собой трудоемкую задачу. По данным экспериментальных исследований для излучения K-серии интенсивность определяется уравнением $I=\varkappa i(U-U_{кр})^r$, где $U_{кр}$ — порог возбуждения серии; i — ток, проходящий через трубку; U — подаваемое напряжение; показатель $r=1{,}6\div 2$; $\varkappa$ — эмпирический параметр. Относительная интенсивность линий спектра определяется вероятностью перехода между уровнями. Для наиболее часто используемой K-серии отношения $I_{\alpha 1}$: $I_{\alpha 2}$: $I_\beta = 10:5:2$, а отношение $\lambda_\alpha : \lambda_\beta = 1{,}09$. Значения относительной интенсивности линий K и L-серий приведены в табл. 35.5 [2, 3].

35.6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом сопровождается вторичным излучением, возникающим в процессе прямого вырывания электронов из атома (*фотоэффект*) и последующего отрыва внешних электронов в ходе заполнения внутренних электронных оболочек. Перестройке электронных оболочек сопутствует излучение рентгеновских квантов с меньшей энергией (*флуоресцентное излучение*), или так называемого оже-электрона (*вторичный фотоэффект*). Прямое взаимодействие рентгеновского излучения с электронами внешних оболочек приводит к возникновению комптоновских электронов. Ко вторичному излучению относится и рентгеновское излучение, неупруго рассеянное на тепловых колебаниях кристаллической решетки. В некоторых случаях при облучении кристалла рентгеновским излучением наблюдается люминесцентное излучение. Все эти процессы ответственны за поглощение рентгеновского излучения. В результате этих процессов и упругого рассеяния интенсивность первичного пучка I_0 при прохождении слоя вещества толщиной t уменьшается по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \exp(-\mu t),$$

где μ — линейный коэффициент ослабления, см$^{-1}$. Если вещество состоит из атомов одного сорта, то полезно ввести так называемый массовый коэффициент ослабления $\mu_m=\mu/\rho$, см^2/г, где ρ — плотность, г/см^3.

Коэффициент ослабления пропорционален приблизительно λ^3, а также Z^3; по мере уменьшения длины волны рентгеновского излучения падает и μ. Однако при некоторых значениях волны ($\lambda_{кр}$) коэффициент ослабления резко возрастает (край полосы поглощения), а затем вновь убывает с уменьшением длины волны по тому же закону.

Для сложного химического вещества линейный коэффициент ослабления можно выразить через массовые концентрации c_i и массовые коэффициенты μ_{mi} элементов, образующих данное соединение: $\mu=\rho\sum_i c_i \mu_{mi}$, где суммирование производится по всем элементам, входящим в сложную молекулу.

Значения массового коэффициента ослабления для K-линий излучающих элементов, широко используемых в исследованиях, приведены в табл. 35.6 [3].

Таблица 35.6. Значения массового коэффициента ослабления μ_m, см²/г, для K_α-и K_β-линий различных излучателей [3]

Поглощающий элемент	Cr $K_{\alpha 1}$	Cr $K_{\beta 1}$	Fe $K_{\alpha 1}$	Fe $K_{\beta 1}$	Co $K_{\alpha 1}$	Co $K_{\beta 1}$	Ni $K_{\alpha 1}$	Ni $K_{\beta 1}$	Cu $K_{\alpha 1}$	Cu $K_{\beta 1}$	Mo $K_{\alpha 1}$	Mo $K_{\beta 1}$
^{3}Li	1,77	1,35	1,08	0,816	0,861	0,646	0,689	0,514	0,557	0,414	0,058	0,270
^{4}Be	4,28	3,25	2,62	1,97	2,08	1,56	1,67	1,24	1,35	1,0	0,240	0,223
^{5}B	8,49	6,46	5,20	3,92	4,13	3,10	3,31	2,49	2,67	1,99	0,360	0,290
^{6}C	14,9	11,3	9,10	6,86	7,23	5,42	5,79	4,32	4,67	3,47	0,555	0,445
^{7}N	28,9	18,1	14,6	11,0	11,6	8,70	9,29	6,93	7,50	5,58	0,820	0,626
^{8}O	35,9	27,3	22,0	16,6	17,5	13,10	14,0	10,4	11,3	8,40	1,17	0,884
^{9}Fe	51,6	39,2	31,6	29,8	25,1	18,80	20,1	15,0	16,2	12,0	1,68	1,20
^{10}Ne	71,3	54,2	43,7	32,9	34,7	26,0	27,8	20,7	22,4	16,7	2,33	1,60
^{11}Na	97,0	74,7	60,7	46,3	48,7	37,0	39,4	30,0	32,1	24,2	3,40	2,18
^{12}Mg	123	94,7	77,0	58,7	61,8	46,9	50,0	37,8	40,8	30,7	4,57	2,95
^{13}Al	153	118	95,8	73,1	76,8	58,4	62,1	47,0	50,7	38,2	5,21	3,68
^{14}Si	187	144	117	89,5	94,1	71,5	76,1	57,6	62,1	46,7	7,12	4,80
^{15}P	226	174	142	108	114	86,3	91,8	69,5	74,9	56,4	8,30	5,73
^{16}S	270	208	196	129	135	103	110	82,9	89,4	67,3	10,3	7,29
^{17}Cl	318	245	199	152	160	121	129	97,8	105	79,4	12,1	8,60
^{18}Ar	372	286	233	178	187	142	151	114	123	92,8	13,5	10,0
^{19}K	407	317	260	201	211	162	172	132	142	108	17,3	11,9
^{20}Ca	462	360	296	228	240	184	196	150	161	123	20,5	13,8
^{21}Sc	521	406	333	258	270	208	221	169	182	139	23,1	16,0
^{22}Ti	585	456	374	289	303	233	248	190	204	156	25,9	18,0
^{23}V	79,9	509	418	323	338	260	276	212	228	174	28,9	20,0
^{24}Cr	90,4	70,1	464	358	376	289	307	235	253	193	32,1	22,2
^{25}Mn	102	79,0	64,6	396	416	320	340	260	280	213	34,8	24,3
^{26}Fe	114	88,5	72,4	55,7	58,5	353	374	287	308	235	39,1	27,8
^{27}Co	127	98,7	80,8	62,2	65,3	50,0	53,2	315	338	258	42,9	32,0
^{28}Ni	141	110	89,8	69,1	72,5	55,6	59,1	45,1	48,5	282	47,0	35,1
^{29}Cu	156	121	99,4	76,5	80.3	61,5	65,4	49,9	53,7	40,8	51,2	39,0
^{30}Zn	173	134	110	84,4	88,6	67,9	72,2	55,1	59,2	45,0	55,7	43,5
^{31}Ga	190	147	121	92,8	97,5	74,7	79,4	60,6	65,1	49,5	60,4	48,0
^{32}Ge	208	162	132	102	107	81,9	87,0	66,4	71,4	54,3	65,5	51,0
^{33}As	228	177	145	111	117	89,5	95,1	72,6	78,1	59,3	70,5	55,0
^{34}Se	248	193	158	121	127	97,6	104	79,9	85,1	64,7	75,8	61,0
^{35}Br	270	210	172	132	139	106	113	86,1	92,6	70,4	81,5	66,0
^{36}Kr	293	227	186	143	150	115	122	93,4	100	76,4	87,4	70,0
^{37}Rb	317	246	201	155	163	125	132	101	109	82,6	90,0	77,0
^{38}Sr	342	266	217	167	176	135	143	109	117	89,2	96,0	83,0
^{39}Y	369	286	234	180	189	145	154	118	126	96,1	100	89,0
^{40}Zr	397	308	252	194	204	156	166	127	136	103	16,7	95,0
^{41}Nb	426	331	271	208	219	168	178	136	146	111	18,0	100
^{42}Mo	456	354	290	223	234	180	191	146	157	119	19,3	14,6
^{43}Tc	488	379	310	239	251	192	204	156	168	127	20,7	15,5
^{44}Ru	522	405	332	255	268	205	218	167	179	136	22,0	16,0
^{45}Rh	557	432	354	272	286	219	233	178	191	145	23,5	17,5
^{46}Pd	593	460	377	290	304	233	248	189	204	155	24,5	18,5
^{47}Ag	631	480	401	309	324	248	264	201	217	165	26,6	19,5
^{48}Cd	670	520	426	328	344	264	280	214	230	175	28,3	20,0
^{49}In	711	552	452	348	365	280	298	227	244	186	30,0	21,0
^{50}Sn	754	585	479	369	387	297	315	241	259	197	32,5	22,0
^{51}Sb	798	620	507	390	410	314	334	255	274	208	33,7	23,0
^{52}Te	845	655	537	413	433	332	353	269	290	220	35,6	24,0
^{53}I	892	692	567	436	458	351	375	285	307	233	38,0	25,5
^{54}Xe	786	731	598	460	483	370	394	300	323	245	39,7	26,5
^{55}Cs	816	759	621	478	502	385	409	312	335	255	41,3	28,0
^{56}Ba	599	700	654	508	528	405	430	328	353	268	43,8	24,0
^{57}La	214	730	687	529	555	426	452	345	371	282	45,5	31,0
^{58}Ce	226	517	602	556	583	447	475	363	390	296	48,5	32,0
^{59}Pr	237	188	447	583	612	469	499	381	409	311	50,7	33,5
^{60}Nd	249	197	469	540	534	492	523	399	429	326	53,0	35,0
^{61}Pm	262	207	172	565	399	516	548	418	450	342	55,4	36,5
^{62}Sm	275	218	181	399	418 L_{III}	485	470 L_{II}	438	471 L_I	358	57,9	38,0
^{63}Eu	289	228	190	417	156	500	358	458	410	374	60,6	39,5

Продолжение табл. 35.6

Поглощающий элемент	Cr $K_{\alpha 1}$	Cr $K_{\beta 1}$	Fe $K_{\alpha 1}$	Fe $K_{\beta 1}$	Co $K_{\alpha 1}$	Co $K_{\beta 1}$	Ni $K_{\alpha 1}$	Ni $K_{\beta 1}$	Cu $K_{\alpha 1}$	Cu $K_{\beta 1}$	Mo $K_{\alpha 1}$	Mo $K_{\beta 1}$
^{64}Gd	304	239	200	156	164	353	374	430	429	392	64,5	41,5
^{65}Tb	318	351	209	163	172	369	142	450	324	409	67,3	43,0
^{66}Dy	333	262	219	170	180	140	149	314	339	385	70,3	44,5
^{67}Ho	348	274	229	178	188	146	156	328	129	270	73,4	46,5
^{68}Er	364	287	239	186	197	153	163	126	135	281	76,5	48,5
^{69}Tm	380	299	250	195	205	160	170	131	141	293	79,7	50,0
^{70}Yb	397	312	261	204	214	167	177	137	147	113	85,1	52,0
^{71}Lu	414	326	272	212	224	174	185	143	154	119	86,5	54,0
^{72}Hf	428	335	279	217	228	177	188	145	156	120	84,0	57,0
^{73}Ta	447	350	291	226	238	184	196	151	162	125	88,0	59,0
^{74}W	466	365	304	236	248	192	205	158	170	130	92,1	62,0
^{75}Re	485	380	317	246	259	200	213	164	177	136	96,4	65,0
^{76}Os	506	396	330	256	270	209	222	171	184	141	101	68,0
^{77}Ir	527	418	343	267	281	217	231	178	192	147	105	71,0
^{78}Pt	548	430	357	278	292	226	241	185	200	153	110	74,0
^{79}Au	570	447	372	289	304	235	251	193	208	159	115	77,0
^{80}Hg	593	464	386	300	316	244	261	201	216	166	120	81,0
^{81}Tl	616	483	402	312	328	254	271	208	224	172	125	82,0
^{82}Pb	640	501	417	324	341	264	281	216	233	178	130	86,0
^{83}Bi	664	520	433	336	354	274	292	225	242	186	136	89,0
^{84}Po	689	540	449	349	368	284	303	233	251	193	141	93,0
^{85}At	715	560	466	362	381	295	314	242	260	200	118	96,8
^{86}Rn	741	581	483	375	395	306	326	251	270	207	124	100
^{87}Er	936	726	602	464	489	375	401	306	330	252	97,8	105
^{88}Ra	982	764	632	487	514	394	421	321	347	264	101	110
^{89}Ac	1030	802	663	511	539	414	442	337	364	277	104	100
^{90}Th	1080	841	696	536	565	434	463	354	382	291	108	76,0
^{91}Pa	1130	881	729	562	593	455	486	371	400	305	115	79,0
^{92}U	—	923	764	589	621	476	509	388	419	319	124*L*	81,0
^{93}Np	—	967	800	616	650	499	533	407	439	334	57,6	84,0
^{94}Pu	—	1010	837	645	681	522	557	426	459	350	60,3	87,0

35.7. ВТОРИЧНЫЕ СПЕКТРЫ И ЭФФЕКТЫ ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Атомы мишени при бомбардировке рентгеновскими фотонами с энергией $h\nu \geqslant \varepsilon_n$ (где ε_n — энергия электрона на n-м уровне) могут перейти в возбужденное состояние и образовать вакансию на внутреннем электронном уровне. При этом мишень испускает так называемое *флуоресцентное* (характеристическое) излучение, соответствующее переходу электронов на вакантный уровень. Тормозное излучение при этом отсутствует. Максимальную длину волны первичного излучения, вызывающего возбуждение флуоресцентного излучения данной серии, называют граничной (или краем полосы поглощения); ее можно легко рассчитать из выражения $h\nu_{гр} = hc/\lambda_{гр} = \varepsilon(n, l, j)$, где n, l и j — главное, азимутальное и внутреннее квантовое число.

Выход флуоресценции для различных серий дан в табл. 35.7. Здесь приведены в основном средние экспериментальные выходы флуоресценции для атомов однократно ионизованных в K-оболочке (ω_K), L-оболочке (ω_L) и M-оболочке (ω_M), а также выходы флуоресценции при переносе дырки K-оболочки в L-оболочку (ω_{KL}) и дырки L-оболочки в M-оболочку (ω_{LM}).

Рентгеновскую флуоресцентную спектроскопию широко используют для определения содержания различных элементов в анализируемых материалах на глубину, соответствующую 10^4—$3 \cdot 10^5$ атомным слоям. Для этих же целей используют электроны, непосредственно вырываемые из атома при прохождении рентгеновского излучения через вещество. Этот метод получил название *электронной спектроскопии для химического анализа* (ЭСХА) и позволяет исследовать 2—10 атомных слоев.

Переход атома в невозбужденное состояние может сопровождаться испусканием не фотона, а электрона. Этот переход называют *вторичным фотоэффектом* или *оже-эффектом*, а соответствующие электроны — *оже-электронами*. Так как энергетический спектр этих электронов определяется разностью энергий разных энергетических состояний атомов, он также является «паспортом» данного сорта атомов, как и характеристическое рентгеновское излучение. Вероятность испускания оже-электронов для атомов с $Z < 33$ даже выше, чем вероятность излучательных переходов.

Спектры вылетающих из образца фото- и оже-электронов чувствительны к электронной структуре, химическим связям, фазовому составу и другим характеристикам кристалла, содержащего эмиттирующий элемент.

Влияние индивидуальных особенностей строения молекул, кристаллов сказывается прежде всего на энергетическом положении K_α-линии. Ширина K_α-линии при переходе от одного соединения к другому меняется незначительно. Однако ширина K_α-линии может дать полезную информацию о симметрии ближайшего окружения атома в веществе.

В рентгеновской спектроскопии основные диаграммные линии нередко сопровождаются сателлитными линиями — слабыми линиями как с коротковолновой сто-

роны (коротковолновые сателлиты), так и с длинноволновой (длинноволновые сателлиты). Сателлнты сильно чувствительны к строению индивидуальных веществ, причем нередко их чувствительность к факторам электронного или геометрического строения превосходит чувствительность основных диаграммных линий. Значительное число сателлитов появляется в результате электронных переходов в многократно ионнзованных атомах. В результате таких переходов появляются, как правило, коротковолновые сателлиты; например, группа сателлитов K_σ -линии (α_1', α_2'', α_3 и α_4) возникает при переходах между состояниями в двукратно ионизованных атомах $KL—L^2$, при этом сама группа из пяти линий возникает благодаря наличию LS-взаимодействня.

Часть сателлитов находнтся далеко от основной линии и не оказывает влияния на ее форму, однако некоторые сателлиты могут существенно повлиять на форму $K\alpha_{1,2}$-линий, особенно в полосе ее «хвостов».

Кроме коротковолновых в $K\alpha$-линии могут наблюдаться и длинноволновые сателлиты, так как в процессе испускания сателлитной линни часть ее энергии может быть унесена оже-электронами. Эти сателлиты, как правило, мало сказываются на форме основной линии.

Химические сдвиги сателлитов, так же как и основных $K\alpha$ -линий, могут быть использованы для идентификации зарядового состояния исследуемого атома (табл. 35.8).

Продолжение табл. 35.7

L-серия

Элемент	ω_{KL}	ω_L	Элемент	ω_{KL}	ω_L	Элемент	ω_{KL}	ω_L
^{23}V	—	0,235	^{55}Cs	—	8,90	^{73}Ta	28,0	22,5
^{25}Mn	—	0,295	^{56}Ba	14,8	9,3	^{74}W	31,0	29,8
^{29}Cu	—	0,56	^{57}La	12,3	11,0	^{75}Re	30,0	—
^{31}Ga	—	0,64	^{58}Ce	16,0	16,3	^{76}Os	32,0	34,8
^{36}Kr	—	7,50	^{59}Pr	12,3	16,7	^{77}Ir	31,0	30,0
^{37}Rb	1,30	1,10	^{60}Nd	16,0	17,0	^{78}Pt	36,0	32,0
^{39}Y	—	5,70	^{61}Pm	18,5	—	^{79}Au	28,7	43,0
^{40}Zr	3,40	—	^{62}Sm	17,0	18,8	^{80}Hg	41,0	40,0
^{41}Nb	2,20	—	^{63}Eu	17,0	17,0	^{81}Tl	44,0	41,0
^{42}Mo	—	6,70	^{64}Gd	18,0	19,8	^{82}Pb	39,5	29,7
^{46}Pd	4,70	—	^{65}Tb	19,5	19,4	^{83}Bi	41,4	33,0
^{47}Ag	4,40	6,59	^{66}Dy	21,0	—	^{88}Ra	—	40,0
^{48}Cd	5,50	—	^{67}Ho	17,0	—	^{90}Th	—	48,8
^{49}In	6,5	—	^{68}Er	21,0	—	^{91}Pa	—	50,0
^{50}Sn	6,4	—	^{69}Tm	23,0	—	^{92}K	40,9	53,0
^{51}Sb	7,0	11,9	^{70}Yb	25,0	—	^{93}Np	—	49,0
^{52}Te	7,3	12,2	^{71}Lu	26,0	29,0	^{94}Pu	—	56,6
^{54}Xe	9,1	—	^{72}Hf	29,0	29,0	^{95}Cm	—	53,1

M-серия

Элемент	ω_{LM}	ω_M	Элемент	ω_{LM}	ω_M
			M-серия		
^{76}Os	1,3	—	^{88}Bi	3,0	3,5
^{79}Au	2,4	2,3	^{92}U	—	6,0
^{82}Pb	2,6	2,9			

Таблица 35.7. **Выход флуоресценции на один акт фотоэффекта, % [3]**

K-серия

Элемент	ω_K	Элемент	ω_K	Элемент	ω_K	Элемент	ω_K
^{4}Be	0,0304	^{24}Cr	28,30	^{44}Ru	79,3	^{64}Gd	93,4
^{5}B	0,056	^{25}Mn	31,30	^{45}Rh	80,7	^{65}Tb	93,7
^{6}C	0,26	^{26}Fe	34,20	^{46}Pd	81,9	^{66}Dy	94,3
^{7}N	0,60	^{27}Co	36,60	^{47}Ag	83,4	^{67}Ho	94,3
^{8}O	0,94	^{28}Ni	41,40	^{48}Cd	84,0	^{68}Er	94,5
^{9}F	1,13	^{29}Cu	44,30	^{49}In	85,0	^{69}Tm	94,8
^{10}Ne	1,82	^{30}Zn	47,90	^{50}Sn	85,9	^{70}Yb	95,0
^{11}Na	2,60	^{31}Ga	52,80	^{51}Sb	86,7	^{71}Lu	95,2
^{12}Mg	3,36	^{32}Ge	55,40	^{52}Te	85,7	^{72}Hf	95,4
^{13}Al	3,80	^{33}As	58,80	^{53}I	88,2	^{73}Ta	95,6
^{14}Si	4,30	^{34}Se	59,60	^{54}Xe	89,4	^{74}W	95,7
^{15}P	6,00	^{35}Br	62,20	^{55}Cs	88,9	^{75}Re	95,9
^{16}S	8,20	^{36}Kr	66,0	^{56}Ba	90,1	^{76}Os	96,1
^{17}Cl	9,55	^{37}Rb	66,9	^{57}La	90,6	^{77}Ir	96,2
^{18}Ar	12,20	^{38}Sr	70,2	^{58}Ce	91,1	^{78}Pt	96,7
^{19}K	11,50	^{39}Y	71,1	^{59}Pr	91,5	^{79}Au	96,4
^{20}Ca	13,80	^{40}Zr	73,0	^{60}Nd	92,0	^{80}Hg	95,8
^{21}Sc	19,00	^{41}Nb	74,8	^{61}Pm	92,4	^{82}Pb	97,2
^{22}Ti	22,10	^{42}Mo	76,4	^{62}Sm	92,8	^{92}U	97,0
^{23}V	25.30	^{43}Tc	77,9	^{63}Eu	92,5	—	—

Таблица 35.8. **Сдвиги Cr $K_{\beta\,1,3}$- и Sn$L_{\beta 2}$ - линий [4]**

Ион	Образец	E, эВ	Ион	Образец	E, эВ
Cr^{3+}	CrF_3	+0,66	Sn^{2+}	$SnCl_2$	+0,176
	$CrCl_3$	+0,56		SnC_2O_4	+0,144
	$CrBr_3$	+0,46		$SnHPO_4$	+0,098
	Cr_2O_3	+0,40		SnS	+0,063
	$CdCr_2Se_4$	+0,77	Sn^{4+}	$SnCl_4$	—0,085
	$CuCr_2S_4$	+0,63		$PbSnO_3$	—0,0179
	$CoCr_2S_4$	+0,71		SnO_2	—0,180
	$CrCr_2S_4$	+0,64		$CaSnOSiO_4$	—0,198
Cr^{4+}	CrO_2	+0,12			
Cr^{5+}	Cr_2O_5	—0,39			
Cr^{6+}	$K_2Cr_2O_7$	—0,84			
	$Fe_2(CrO_4)_3$	—0,74			
	K_2CrO_4	—0,91			
	Na_2CrO_4	—0,84			
	$Cu_2Cr_2O_7\times$ $\times 2H_2O$	—0,79			
	$CaCrO_4$	—0,64			
	$BaCrO_4$	—0,86			
	CrO_3	—0,83			

Примечание. Положения Cr$K_{\beta,\,1,3}$ и Sn$L_{\beta 2}$ соответственно в чистом Cr и Sn приняты за 0 эВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вайнштейн Б. К.** Современная кристаллография. М.: Наука. Т. 1, 1981.
2. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под ред. академика И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
3. **Блохин М. А., Швейцер И. Г.** Рентгеноспектральный справочник. М.: Наука, 1982.
4. **Мазалов Л. Н., Трейгер Б. А.** Эффекты химической связи в рентгеноспектральном анализе//Журн. структурной химии. 1983. Т. 24, № 2. С. 128—155.

Глава 36
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Ю. П. Никитин

36.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

К разряду *элементарных частиц* следовало бы относить наиболее простые, неделимые частицы материи. Исследования строения атомов и атомных ядер показали, что эти микрообъекты являются составными. Электроны, находящиеся на периферии атома, протоны и нейтроны, образующие атомные ядра, стали называть элементарными частицами, подчеркивая тем самым, что они более простые частицы, чем атомы и ядра атомов. К элементарным частицам причислили фотоны — кванты электромагнитного поля, а также нейтрино, появляющиеся в процессах β-распада ядер. Дальнейшие исследования показали, что в процессах взаимодействия элементарных частиц образуются и другие типы частиц, большинство из которых взаимодействуют с протонами и нейтронами и между собой с такой же интенсивностью, как протоны и нейтроны в ядрах атомов. Эту большую группу частиц также назвали элементарными. Однако оказалось, что большинство частиц, отнесенных к разряду элементарных, нестабильны и могут в результате распада превращаться в другие элементарные частицы. При этом нельзя считать, что продукты распада более элементарны, чем сами распадающиеся частицы, поскольку, как правило, наблюдается несколько различных каналов распада одной и той же частицы. Поэтому нельзя заключить, что нестабильные частицы состоят из частиц — продуктов распада. Обнаружены были также частицы, напоминающие по своим свойствам электроны, но являющиеся нестабильными и существенно более массивными, чем электрон. Установлено существование трех разновидностей нейтрино.

Таким образом, к разряду элементарных частиц в настоящее время принято относить все микрочастицы, за исключением ядер атомов с массовым числом больше единицы [1]. Имеются серьезные основания считать, что большинство «элементарных» частиц обладает внутренней структурой, но в то же время у таких частиц, как, например, электрон, нейтрино, внутренняя структура не обнаружена при исследовании до расстояний порядка 10^{-16} см [2, 3].

36.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В исследованной области энергий, которая соответствует пространственному разрешению порядка 10^{-15}—10^{-16} см, различают четыре основных вида взаимодействий частиц: сильное, электромагнитное, слабое, гравитационное [1, 2]. В гравитационных взаимодействиях участвуют все элементарные частицы, но гравитационные силы очень слабы, так как малы массы элементарных частиц. Например, гравитационное взаимодействие двух протонов в 10^{-36} раз слабее их электростатического кулоновского взаимодействия. Все электрически заряженные частицы и некоторые нейтральные участвуют в электромагнитных взаимодействиях. Самую большую группу образуют частицы, участвующие в сильных взаимодействиях. В частности, сильные взаимодействия обусловлены ядерными силами, действующими между протонами и нейтронами на расстояниях, меньших 10^{-13} см, обеспечивающими стабильность атомных ядер.

Сильновзаимодействующие частицы называют *адронами*. Известно несколько сот их разновидностей. Адроны участвуют во всех видах взаимодействий. Среди них различают *мезоны*, частицы с целочисленным значением спинового квантового числа, и *барионы*, частицы с полуцелым спином. Все адроны, за исключением, может быть, протона, нестабильны относительно сильного, электромагнитного или слабого взаимодействия. Адроны, нестабильные относительно сильного взаимодействия, принято называть *резонансами*.

Частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях, образуют два небольших семейства. Одно из них представляют *лептоны* — электрон, мюон, τ-лептон, а также электронное, мюонное и τ-нейтрино. Другое семейство до последнего времени представлял фотон — безмассовая частица со спином, равным единице, являющаяся переносчиком электромагнитного взаимодействия, квантом электромагнитного поля. В 1983 г. были открыты массивные заряженные ($W^{\pm}$) и нейтральный (Z^0) бозоны — частицы со спином, равным единице, являющиеся переносчиками слабого взаимодействия. Фотон, $W^{\pm}$- и Z^0-бозоны относят к семейству *векторных калибровочных бозонов*.

Слабое взаимодействие ответственно за распады адронов и лептонов, стабильных относительно сильного и электромагнитного взаимодействий. Эффективный радиус слабого взаимодействия не превышает 10^{-16} см. Поэтому на больших расстояниях оно существенно слабее электромагнитного, которое, в свою очередь, до расстояний порядка 10^{-13} см слабее сильного взаимодействия. На расстояниях, меньших 10^{-16} см, слабые и электромагнитные взаимодействия, как выяснилось в последнее время, образуют *единое электрослабое взаимодействие*. Возможно, что не только слабое и электромагнитное взаимодействия имеют единую природу, но и остальные виды взаимодействия представляют собой проявление некоторого единого фундаментального взаимодействия. Свидетельством единой природы слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий могло бы быть экспериментальное доказательство нестабильности протона.

Большинство адронов и все известные лептоны имеют партнеров с такими же массой и временем жизни, но противоположных по ряду других характеристик. Эти партнеры называются *античастицами*.

36.3. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ И ВНУТРЕННИЕ СИММЕТРИИ

Во всех взаимодействиях элементарных частиц, включая соударения и распады, выполняются законы сохранения энергии, импульса и момента количества движения (в квантовомеханической трактовке). Эти законы, как известно, являются следствием однородности пространства-времени Минковского и изотропности трехмерного пространства, в котором осуществляются процессы взаимодействия. Кроме указанных законов сохранения, связанных с симметрией пространства-времени, в процессах взаимодействия элементарных частиц с той или иной степенью строгости выполняется еще ряд законов сохранения, обусловленных внутренними квантовыми числами частиц (иначе, внутренними симметриями), которые были установлены экспериментально [1].

Строгие законы сохранения квантовых чисел элементарных частиц имеют место во всех видах взаимодействия. К таким законам, нарушение которых пока не обнаружено, относятся: *сохранение электрического заряда* — суммарный электрический заряд частиц в начале процесса взаимодействия и суммарный электрический заряд частиц, образующихся в результате взаимодействия, совпадают (электрический заряд элементарной частицы по абсолютному значению кратен заряду электрона e); *сохранение барионного заряда* — во всех процессах взаимодействия изменение числа барионов должно сопровождаться точно таким же изменением числа антибарионов. Барионам приписывается барионный заряд $B=1$, антибарионам $B=-1$. Барионный заряд остальных частиц $B=0$; *электронный, мюонный* и *τ-лептонный заряды* приписываются соответственно электрону и электронному нейтрино ν_e ($l_e=1$), мюону и мюонному нейтрино ν_μ ($l_\mu=1$), τ-лептону и τ-нейтрино ν_τ ($l_\tau=1$). Антилептонам приписываются противоположные по знаку лептонные заряды. Для остальных известных частиц $l_e=l_\mu=l_\tau=0$. Экспериментальные данные свидетельствуют о сохранении лептонных зарядов всех трех разновидностей в отдельности. Имеются теоретические основания полагать, что законы сохранения барионного и лептонных зарядов не являются строгими [3].

Нестрогие законы сохранения квантовых чисел элементарных частиц имеют место в одних типах взаимодействий и нарушаются в других. К таким квантовым числам относят: изотопический спин, гиперзаряд, пространственную и зарядовую четности, G-четность и ряд других.

Изотопический спин I представляет собой внутреннюю характеристику адрона, отражающую инвариантность сильных взаимодействий относительно вращений в воображаемом трехмерном изоспиновом пространстве. Квантовое число I определяет значение квадрата вектора изотопического спина, I ($I^2=I(I+1)$), приписываемого мультиплету адронов с одинаковыми свойствами по отношению к сильным взаимодействиям и с примерно одинаковыми массами и другими характеристиками, кроме электрических зарядов. Число адронов в изотопическом мультиплете составляет $2I+1$. В процессах сильного взаимодействия сохраняется квантовое число I полного изотопического спина частиц, участвующих в реакции, и квантовое число третьей проекции полного изотопического спина I_3, которое определяется как алгебраическая сумма проекций изотопического спина взаимодействующих адронов. В электромагнитных взаимодействиях адронов полный изотопический спин не сохраняется, но сохраняется его проекция. В слабых взаимодействиях нарушаются законы сохранения как I, так и I_3.

Странность S как внутреннее квантовое число приписывается некоторым мезонам (каонам) и барионам, которые принято называть *гиперонами*. Закон сохранения странности как аддитивного квантового числа установлен эмпирически в процессах сильного и электромагнитного взаимодействий. Слабые взаимодействия нарушают этот закон. Сохранение странности приводит к стабильности (относительно сильных взаимодействий) каонов и наименее массивных гиперонов, которые распадаются в результате слабого или электромагнитного (Σ^0-гиперон) взаимодействия.

Очарование c, *прелесть* b — новые типы аддитивных квантовых чисел, приписываемых наиболее тяжелым из открытых недавно адронов. Подобно странности эти квантовые числа сохраняются в сильных и электромагнитных взаимодействиях, но не сохраняются в слабых взаимодействиях.

Гиперзаряд Y есть сумма квантовых чисел: $Y=B+S+c+b$, он связан с электрическим зарядом Q (в единицах $|e|$) и проекцией изотопического спина I_3 следующим соотношением: $Q=I_3+Y/2$.

Пространственная четность P элементарной частицы определяется характером преобразования ее волновой функции при зеркальном отражении пространственных координат в системе отсчета, где свободная частица покоится. Если частица обладает определенной четностью, то $P=\pm 1$.

Зарядовая четность C является внутренним квантовым числом так называемых истинно нейтральных частиц, у которых античастицы и частицы совпадают, а также нейтральных составных систем, которые при зарядовом сопряжении (замене частиц античастицами) переходят сами в себя. В слабых взаимодействиях нарушаются законы сохранения P- и C-четности, но в большинстве случаев сохраняется комбинированная CP-четность. В распадах нейтральных каонов нарушается и CP-четность.

G-четность определяется как собственное значение оператора $G=C\exp(i\pi I_2)$, где I_2 — вторая проекция изотопического спина, G-четность представляет собой внутреннее квантовое число адронов или систем адронов с нулевой странностью (очарованием, прелестью) и нулевым барионным зарядом. G-четность сохраняется только в сильных взаимодействиях.

36.4. КВАРКОВАЯ СТРУКТУРА АДРОНОВ

Все обнаруженные виды адронов могут быть «сконструированы» из небольшого числа гипотетических фундаментальных частиц, получивших название *кварки* [2, 3]. Минимальное число сортов (ароматов) кварков, которое необходимо для этого, равно пяти. Кваркам приписываются такие квантовые числа, как спин, изотопический спин, странность, очарование, прелесть, электрический и барионный заряды. Выбор спинового квантового числа кварка, равного $S=1/2$, обеспечивает возможность конструирования адронных состояний с любым целочисленным или полуцелым значением спина. Два кварка из пяти, u и d, образуют изотопический дублет, т. е. им приписывается изотопический спин $I=1/2$ и его проекция $I_3=\pm 1/2$, что позволяет сконструировать любой изотопический мультиплет адронов. Кварки s-, c- и b-типов являются изосинглетами ($I=0$) и характеризуются соответственно квантовыми числами странностью S, очарованием c и прелестью b.

Существуют веские теоретические аргументы в пользу существования шестого сорта кварков t со специфическим внутренним квантовым числом t. Одновременно предполагается существование соответствующих антикварков. Квантовые числа кварков представлены в табл. 36.1. Мезоны можно составить из кварка и антикварка, барионы — из трех кварков, антибарионы — из трех антикварков. Выбирая различные спиновые состояния кварков и их относительные орбитальные моменты,

можно построить наблюдаемые адронные состояния с любыми значениями спина и четности. Поскольку кварки с разными квантовыми числами равноправны, каждому из них приписывается дробный барионный заряд $B=1/3$ (у антикварков $B=-1/3$). Тогда по формуле $Q=I_3+Y/2$, где $Y=B+S+c+b+t$, вычисляется заряд кварка Q, который также оказывается дробным (по отношению к абсолютному значению заряда электрона). Квантовые числа антикварков противоположны по знаку квантовым числам кварков, указанным в табл. 36.1 (кроме I).

В табл. 36.2, 36.3 приводится кварковый состав наиболее распространенных мезонов и барионов, содержащих кварки трех сортов: u, d, s. Символом J^P обозначены спин и четность адрона (полный момент и четность системы кварков, образующих адрон); I, I_3 — изотопические квантовые числа адронов; Y — их гиперзаряд. Адроны, указанные в табл. 36.2, 36.3, образуют мультиплеты, состоящие из восьми или десяти частиц, массы которых отличаются от средней массы частиц мультиплета на 10—15%. Исключение составляют аномально легкие пионы ($\pi^{\pm}$, π^0). Наблюдаемое объединение близких по массам адронов в более сложные по сравнению с изотопическими мультиплеты свидетельствует о том, что в мире адронов осуществляется, хотя и приближенно, более высокая симметрия, чем изотопическая. Она получила название *унитарной симметрии*.

Унитарные мультиплеты (табл. 36.2) представляют собой состояния, преобразующиеся по неприводимым представлениям группы SU (3) [2, 3] Базисным представлением этой группы являются трехкомпонентные спиноры. Кварки u, d, s как раз и отвечают состояниям, образующим базисное представление группы SU (3). Включение в рассмотрение c-, b- и t- кварков приводит к расширению группы симметрии до SU (4), SU (5) и SU (6) соответственно. Экспериментальные данные о массах адронов, содержащих c-кварки, указывают на то, что симметрия SU (4) нарушена в мире адронов уже гораздо сильнее, чем SU (3). SU (4) и более высокие симметрии проявляются в существовании адронных мультиплетов, образующих частицы, сильно различающиеся по массам. Реализация в природе лишь таких адронных состояний, которые предсказываются кварковой моделью, — серьезный аргумент в пользу существования кварков как реальных физических объектов, а не математических символов, отражающих приближенную, сильно нарушенную симметрию в мире адронов. До настоящего времени сколько-нибудь убедительных прямых экспериментальных доказательств существования кварков в свободном состоянии нет. Однако кроме успешной классификации адронов по мультиплетам получены косвенные свидетельства существования внутри адронов кварков с предсказываемыми квантовыми числами. Перечислим лишь некоторые эксперименты такого рода. Это эксперименты по спектроскопии семейств J/ψ- и Υ-мезонов, по глубоконеупругому взаимодействию заряженных лептонов и нейтрино с нуклонами, процессы e^+e^--аннигиляции в адроны и другие исследования, которые успешно интерпретируются в рамках гипотезы о существовании внутри адрона кварков как его составных частей с эффективным размером, существенно меньшим размеров адронов. Сильное нарушение в адронном мире SU (4)-и более высоких симметрий связывается с заметным утяжелением кварков c, b и t по сравнению с u, d, s [2, 3].

Таблица 36.1. **Квантовые числа кварков**

Сорт кварка	Q	B	I	I_3	S	c	b	t	Y
u	2/3	1/3	1/2	1/2	0	0	0	0	—1/3
d	—1/3	1/3	1/2	—1/2	0	0	0	0	1/3
s	—1/3	1/3	0	0	—1	0	0	0	—2/3
c	2/3	1/3	0	0	0	1	0	0	4/3
b	—1/3	1/3	0	0	0	0	—1	0	—2/3
t (?)	2/3	1/3	0	0	0	0	0	1	4/3

Таблица 36.2. **Кварковый состав адронных октетов**

Y	I	I_3	Барионы $J^P=1/2^+$	Кварковый состав	Мезоны $J^P=0^-$	Кварковый состав	Мезоны $J^P=1^-$	Кварковый состав
1	1/2	1/2	p	uud	K^+	$u\bar{s}$	K^{*+}	$u\bar{s}$
1	1/2	—1/2	n	ddu	K^0	$d\bar{s}$	K^{*0}	$d\bar{s}$
0	1	1	Σ^+	uus	π^+	$u\bar{d}$	ρ^+	$u\bar{d}$
0	1	0	Σ^0	uds	π^0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u}-d\bar{d})$	ρ^0	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u}-d\bar{d})$
0	1	—1	Σ^-	dds	π^-	$d\bar{u}$	ρ^-	$d\bar{u}$
0	0	0	Λ	uds	η	$u\bar{u}$, $d\bar{d}$, $s\bar{s}$	ω, φ	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u}+d\bar{d})$, $s\bar{s}$
—1	1/2	1/2	Ξ^0	uss	$\bar{K}^0$	$\bar{d}s$	$\bar{K}^{*0}$	$\bar{d}s$
—1	1/2	—1/2	Ξ^-	dss	K^-	$\bar{u}s$	K^{*-}	$\bar{u}s$

Примечание. η-Мезон является смесью состояний унитарного скаляра и изотопического скаляра из унитарного октета мезонов 0^-.

Таблица 36.3. **Кварковый состав барионного декуплета**

Барионы $J^P = 3/2^+$	Y	I	I_3	Кварковый состав
Δ^{++}	1	3/2	3/2	*uuu*
Δ^{+}	1	3/2	1/2	*uud*
Δ^{0}	1	3/2	—1/2	*udd*
Δ^{-}	1	3/2	—3/2	*ddd*
Σ^{*+}	0	1	1	*uus*
Σ^{*0}	0	1	0	*uds*
Σ^{*-}	0	1	—1	*dds*
Ξ^{*0}	—1	1/2	1/2	*uss*
Ξ^{*-}	—1	1/2	—1/2	*dss*
Ω^{-}	—2	0	0	*sss*

36.5. ЭЛЕКТРОСЛАБОЕ И СИЛЬНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Открытие в 1983 г. векторных $W^{\pm}$- и Z^0-бозонов в предсказанной теорией области масс: m $(W^{\pm}) \approx 80$ ГэВ, m $(Z^0) \approx$ 90 ГэВ укрепило доверие к теоретическим калибровочным схемам, объединяющим различные типы взаимодействий в единое взанмодействие. Теория электромагнитных взаимодействий с сохраняющимся электрическим зарядом может быть построена на основе локальной калибровочной симметрии U (1). Это группа унитарных преобразований с одним параметром, зависящим от координат точки пространства Минковского, где осуществляется преобразование. Она является абелевой — различные U (1)-преобразования коммутируют между собой. Рассмотрение неабелевых групп калибровочных преобразований, в частности локальной калибровочной симметрии SU (2)$\oplus U$ (1), требующей введения четырех калнбровочных безмассовых векторных полей, позволило построить единую теорию слабых и электромагнитных взаимодействий. При этом первоначально безмассовые векторные калибровочные бозоны приобрели, за исключением фотона, массы за счет взаимодействия со скалярным полем, спонтанно нарушающим SU (2)$\oplus U$ (1)-симметрию вакуумного состояния (механизм Хиггса) до электромагнитной калибровочной симметрии U_{em} (1).

В основу калибровочной теорин сильных взаимодействий [4] положена калибровочная симметрия SU (3)$_c$. Использование этой группы симметрии связано прежде всего с необходимостью обеспечить выполнение требований статистики Ферми — Дирака для грехкварковых систем, образующих, например, Δ^{++}- или Ω^{-}-барионы в состояниях с проекцией спина $J_3 \approx 3/2$, при нулевых значениях кварковых относительных орбитальных моментов, характерных для основных состояний связанных систем. Простейший способ обеспечить антнсимметрию указанных состояний барионов относительно перестановки любой пары кварков — приписать каждому кварку с заданным ароматом (*ароматом* часто называют сорт кварка — *u*, *d*, *s*, *c* и т. д.) еще одно квантовое число, которое может принимать три различных значения. Это квантовое число получило название *цвет*. Антисимметризация волновых функций кварков по цветовым степеням свободы обеспечивает требования статистики Ферми — Дирака для барионных состояний со спином и четиостью $3/2^+$.

Указанные три цветовых состояния образуют спинорный базис группы SU (3)$_c$. Предположение о строгой инвариантности сильных взаимодействий относительно цветовой калибровочной группы преобразований SU (3)$_c$ приводит к практическн однозначному построению теории сильных взаимодействий кварков, которые осуществляются за счет обмена безмассовыми векторными частицами — *глюонами*, обладающими восемью цветовыми степенями свободы. В таком подходе фигурирует единственный параметр теории — безразмерная константа сильного взаимодействия $\alpha_s = g^2/\hbar c$, где g — аналог электрического заряда, называемый *цветовым зарядом*.

Как и квантовая электродинамика (КЭД), теория взаимодействия цветных кварков и глюонов — квантовая хромодинамика (КХД) — оказывается перенормируемой, что считается несомненным теоретическим достоинством. В отличне от фотона, который электронейтрален, глюоны обладают цветовыми зарядамн и взаимодействуют друг с другом даже в отсутствие кварков. Это обстоятельство приводит к специфическому поведению перенормированной константы сильного взаимодействия $\alpha_s(r)$ в зависимостн от расстояния между взаимодействующими кварками. По существу величину $\alpha_s(r)$ уже нельзя называть константой. Для нее придумано специальное название — бегущая константа сильного взаимодействия. В то время как в КЭД аналогичная величина $\alpha(r)$ логарифмически растет при $r \longrightarrow 0$, в КХД из-за указанного эффекта взаимодействия глюонов между собой при $r \longrightarrow 0$ бегущая константа сильного взаимодействия ведет себя как $\alpha_s(r) \sim [\ln (r_0/r)]^{-1} \longrightarrow 0$ (r_0 — размер адрона). Этот эффект получил наименование *асимптотической свободы* сильных взаимодействий. Его существование позволяет проводить расчеты процессов сильного взаимодействия на малых расстояниях (прн больших передаваемых нмпульсах) по теории возмущений. Более того, экстраполяция поведения $\alpha_s(r)$ на большие расстояния r между взаимодействующими цветными кварками указывает на возможность запирания кварков в адроне.

Этот эффект пока не доказан теоретически, так как при $\alpha_s(r) \geqslant 1$ нельзя пользоваться теорней возмущений и необходимо развить методы расчета, применимые при больших значениях эффективной константы взаимодействия. Тем не менее обнаруженные экспериментально адроны являются бесцветными. Они — скаляры группы SU (3)$_c$. **Гипотеза** запирания цветных кварков внутри адронов позволяет понять, почему наблюдаются только бесцветные адроны и почему кварки не существуют в свободном состоянии. Наконец, следует отметить, что вплоть до расстоянний порядка 10^{-16} см не обнаружено никакой структуры у электронов и мюонов [3]. Это дает основания рассматривать лептоны, наряду с кварками и калибровочными бозонами, как фундаментальные микрочастицы материи, которые определяют свойства и взаимодействия элементарных частиц, по крайней мере, на расстояниях, больших 10^{-16} см.

36.6. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, СТАБИЛЬНЫЕ ПО ОТНОШЕНИЮ К РАСПАДАМ ПО СИЛЬНОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ

Погрешности измерений, приведенные в табл. 36.4, представляют собой в большинстве случаев средние квадратические отклонения. Если приводятся результаты обработки различных экспериментальных данных и погрешности измерений распределены при этом не по нормальному закону, то истинная погрешность находится умножением вычисленной погрешности на множитель S, приводимый в табл. 36.4. В таблице C_n — зарядовая четность нейтральной частицы; Γ — полная шнрина распада в энергетических единицах; p — наибольшее из возможных значений импульса одной из частиц — продукта распада в системе покоя распадающейся частицы; c — скорость света; h — адрон; $\gamma_{R,L}$ — право- или левополяризовавшый фотон. Символ $\alpha \overline{\downarrow}$ ($\alpha^+ \longrightarrow CC$) означа-

Таблица 36.4. **Характеристики элементарных частиц, стабильных по отношению к распадам по сильному взаимодействию [5]**

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	p, МэВ/c
			Калибровочные бозоны			
γ	$0,1\ (1^-)-$	$< 3\cdot10^{-33}$	Стабилен	—	—	—
$W^\pm$	$J=1$	80 800 (2700)	$\Gamma < 7$ ГэВ	$e\nu$	Обнаружен	40 400
Z	$J=1$	92 900 (1600)	$\Gamma < 8,5$ ГэВ	e^+e^-	Обнаружен	46 450
				$\mu^+\mu^-$	Обнаружен	46 450
			Лептоны			
ν_e	$J=1/2$	$< 4,6\cdot10^{-5}$	Стабильно, $\tau > 3\cdot10^8 m_{\nu_e}$ МэВ	—	—	—
e	$J=1/2$	0,5110034 (14)	Стабилен, $\tau > 2\cdot10^{22}$ лет	—	—	—
ν_μ	$J=1/2$	0 ($<0,50$)	Стабильно, $\tau > 1,1\cdot10^5 m_{\nu_\mu}$ МэВ	—	—	—
μ	$J=1/2$	105,65932 (29)	$2,19709\ (5)\cdot10^{-6}$	μ^- ($\mu^+ \to CC$)		
				$e^-\bar{\nu}\nu$	0,986 (4)	53
				$e^-\bar{\nu}\nu\gamma$	0,014 (4)	53
				$e^-\nu_e\bar{\nu}_\mu$	$<0,05$	53
				$e^-\gamma$	$<1,7\cdot10^{-10}$	53
				$e^-e^+e^-$	$<1,9\cdot10^{-9}$	53
				$e^-\gamma\gamma$	$<8,4\cdot10^{-9}$	53
				$e^-\bar{\nu}\nu e^+e^-$	$2,2\ (1,5)\cdot10^{-5}$	53
ν_τ	$J=1/2$	< 164	—	—	—	—
τ	$J=1/2$	1784,2 (3,2)	$3,4\ (0,5)\cdot10^{-13}$	τ^- ($\tau^+ \to CC$)		
				$\mu^-\bar{\nu}\nu$	0,185 (11)	889
				$e\bar{\nu}\nu$	0,165 (9)	892
				h^- + нейтральные частицы	0,481 (20)	—
				$3h^\pm$ + нейтральные частицы	0,170 (13)	—
				$5h^\pm$ + нейтральные частицы	$<0,014$	—
				$3h^\pm\nu$	0,05 (4)	—
				$3h^\pm\nu$ ($\geqslant 1\gamma$)	0,12 (4)	—
				$\pi^-\nu$	0,103 (12)	887
				$\rho^-\nu$	0,221 (24)	726
				$K^-\nu$	0,013 (5)	824
				K^- + нейтральные частицы	Мала́	—
				K^{*-} (892)ν	0,017 (7)	669
				K^{*-} (1430) ν	$<0,009$	323
				$\pi^-\rho^0\nu$	0,054 (17)	718
				$e+\mu^-$ + заряженные частицы	$<0,04$	—

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	p, МэВ/с
				$\mu^-\gamma$	$< 5{,}5 \cdot 10^{-4}$	889
				$e^-\gamma$	$< 6{,}4 \cdot 10^{-4}$	892
				$\mu^-\mu^+\mu^-$	$< 4{,}9 \cdot 10^{-4}$	876
				$e^-\mu^+\mu^-$	$< 3{,}3 \cdot 10^{-4}$	886
				$\mu^-e^+e^-$	$< 4{,}4 \cdot 10^{-4}$	889
				$e^-e^+e^-$	$< 4{,}0 \cdot 10^{-4}$	892
				$\mu^-\pi^0$	$< 8{,}2 \cdot 10^{-4}$	884
				$e^-\pi^0$	$< 2{,}1 \cdot 10^{-3}$	887
				$\mu^- K^0$	$< 1{,}0 \cdot 10^{-3}$	819
				$e^- K^0$	$< 1{,}3 \cdot 10^{-3}$	823
				$\mu^-\rho^0$	$< 4{,}4 \cdot 10^{-4}$	722
				$e^-\rho^0$	$< 3{,}7 \cdot 10^{-4}$	726
			Нестранные мезоны			
$\pi^\pm$	$1^-(0^-)$	139,5673 (7)	$2{,}6030\,(23) \cdot 10^{-8}$	$\pi^+_\downarrow$ $(\pi^- \to CC)$		
		$m_{\pi^\pm} - m_{\mu^\pm} = 33{,}9080\,(8)$		$\mu^+\nu$	~ 1	30
				$e^+\nu$	$1{,}232\,(24) \cdot 10^{-4}$	70
				$\mu^+\nu\gamma$	$1{,}24\,(25) \cdot 10^{-4}$	30
				$e^+\nu\gamma$	$5{,}6\,(7) \cdot 10^{-8}$	70
				$e^+\nu\pi^0$	$1{,}033\,(34) \cdot 10^{-8}$	5
				$e^+\nu e^+e^-$	$< 5 \cdot 10^{-9}$	70
				$\mu^+\bar{\nu}_e$	$< 1{,}5 \cdot 10^{-3}$	30
				$\mu^+\nu_e$	$< 8 \cdot 10^{-3}$	30
π^0	$1^-(0^-)^+$	134,9630 (38)	$0{,}83\,(6) \cdot 10^{-16}$	$\gamma\gamma$	0,98802 (20)	67
		$m_{\pi^\pm} - m_{\pi^0} = 4{,}6043\,(37)$	$S = 1{,}8$	γe^+e^-	0,0198	67
				$\gamma\gamma\gamma$	$< 3{,}8 \cdot 10^{-7}$	67
				$e^+e^-e^+e^-$	$3{,}24 \cdot 10^{-5}$	67
				$\gamma\gamma\gamma\gamma$	$< 4 \cdot 10^{-6}$	67
				e^+e^-	$(1{,}8 \pm 0{,}7) \cdot 10^{-7}$	67
				$\nu\nu$	$< 2{,}4 \cdot 10^{-5}$	67
				$\mu^+e^- + \mu^-e^+$	$< 7 \cdot 10^{-8}$	26
η	$0^+(0^-)^+$	548,8 (6)	$\Gamma = 0{,}88\,(12)$ кэВ	$\gamma\gamma$	0,390 (8)	274
		$S = 1{,}4$	Нейтральные распады $(70{,}9 \pm 0{,}7)$ %	$3\pi^0$	0,318 (8), $S=1{,}1$	180
				$\pi^0\gamma\gamma$	0,10 (2)	258
				$\pi^+\pi^-\pi^0$	0,237 (5)	175
			Заряженные распады $(29{,}1 \pm 0{,}7)$ %	$\pi^+\pi^-\gamma$	0,0491 (13)	236
				$e^+e^-\gamma$	0,0050 (12)	274
				$\mu^+\mu^-\gamma$	$3{,}1\,(4) \cdot 10^{-4}$	253
				e^+e^-	$< 3 \cdot 10^{-4}$	274
				$\mu^+\mu^-$	$6{,}5\,(2{,}1) \cdot 10^{-6}$	253
				$\pi^+\pi^-e^+e^-$	0,0013 (13)	236
				$\pi^+\pi^-\gamma\gamma$	$< 0{,}0021$	236
				$\pi^+\pi^-\pi^0\gamma$	$< 0{,}0006$	175
				$\pi^+\pi^-$	$< 0{,}0015$	236
				$\pi^0e^+e^-$	$< 5 \cdot 10^{-5}$	258
				$\pi^0\mu^+\mu^-$	$< 5 \cdot 10^{-6}$	211
				$\pi^0\mu^+\mu^-\gamma$	$< 3 \cdot 10^{-6}$	211
			Странные мезоны			
$K^\pm$	$1/2\,(0^-)$	493,667 (15)	$1{,}2371\,(26) \cdot 10^{-8}$	$K^+_\downarrow$ $(K^- \to CC)$		
		$m_{K^\pm} - m_{K^0} = -4{,}01\,(13)$	$S = 1{,}9$	$\mu^+\nu$	0,6351 (16)	236
		$S = 1{,}1$		$\pi^+\pi^0$	0,2117 (15)	205
				$\pi^+\pi^+\pi^-$	0,0559 (3), $S=1{,}1$	125
				$\pi^+\pi^0\pi^0$	0,0173 (5), $S=1{,}4$	133
				$\pi^0\mu^+\nu$	0,0318 (10), $S = 1{,}9$	215
				$\pi^0e^+\nu$	0,0482 (5), $S=1{,}1$	228

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	p, МэВ/с
				$\mu^+\nu\gamma$	$(5,8\pm3,5)\cdot10^{-3}$	236
				$\pi^0\pi^0e^+\nu$	$\left(1,8^{+2,4}_{-0,6}\right)\cdot10^{-5}$	207
				$\pi^+\pi^-e^+\nu$	$(3,90\pm0,15)\cdot10^{-5}$	203
				$\pi^+\pi^+e^-\bar{\nu}$	$<1,2\cdot10^{-8}$	203
				$\pi^+\pi^-\mu^+\nu$	$(1,4\pm0,9)\cdot10^{-5}$	151
				$\pi^+\pi^+\mu^-\bar{\nu}$	$<3,0\cdot10^{-6}$	151
				$e^+\nu$	$(1,54\pm0,07)\cdot10^{-5}$	247
				$e^+\nu\gamma_R$	$(1,52\pm0,23)\cdot10^{-5}$	247
				$e^+\nu\gamma_L$	$<1,6\cdot10^{-4}$	247
				$\pi^+\pi^0\gamma$	$(2,75\pm0,16)\cdot10^{-4}$	205
				$\pi^+\pi^+\pi^-\gamma$	$(1,0\pm0,4)\cdot10^{-4}$	125
				$\pi^0\mu^+\nu\gamma$	$<6\cdot10^{-5}$	215
				$\pi^0e^+\nu\gamma$	$(3,7\pm1,4)\cdot10^{-4}$	228
				$\pi^+e^+e^-$	$(2,7\pm0,5)\cdot10^{-7}$	227
				$\pi^-e^+e^+$	$<1\cdot10^{-8}$	227
				$\pi^+\mu^+\mu^-$	$<2,4\cdot10^{-6}$	172
				$\pi^+\gamma\gamma$	$<8\cdot10^{-6}$	227
				$\pi^+\gamma\gamma\gamma$	$<1,0\cdot10^{-4}$	227
				$\pi^+\nu\bar{\nu}$	$<1,4\cdot10^{-7}$	227
				$\pi^\mp e^+\mu^\pm$	$<7\cdot10^{-9}$	214
				$\pi^+e^-\mu^+$	$<5\cdot10^{-9}$	214
				$e^+\nu\nu\bar{\nu}$	$<6\cdot10^{-5}$	247
				$\mu^+\nu\nu\bar{\nu}$	$<6\cdot10^{-6}$	236
				$\mu^+\nu e^+e^-$	$(11\pm3)\cdot10^{-7}$	236
				$\mu^-\nu e^+e^+$	$<2,0\cdot10^{-8}$	236
				$e^+\nu e^+e^-$	$\left(2^{+2}_{-1}\right)\cdot10^{-7}$	247
				$\mu^+\nu_e$	$<4\cdot10^{-3}$	236
				$\mu^+\bar{\nu}_e$	$<3,3\cdot10^{-3}$	236
				$\pi^0e^+\bar{\nu}_e$	$<3\cdot10^{-3}$	228
$K^0, \bar{K}^0$	$1/2\,(0^-)$	497,67 (13) $S=1,1$	—	50% K_S 50% K_L	—	—
K^0_S	$1/2\,(0^-)$	—	$0,8923\,(22)\cdot10^{-10}$	$\pi^+\pi^-$	0,6861 (24), $S=1,1$	206
				$\pi^0\pi^0$	0,3139	209
				$\pi^+\pi^-\gamma$	$(1,85\pm0,10)\cdot10^{-3}$	206
				$\mu^+\mu^-$	$<3,2\cdot10^{-7}$	225
				e^+e^-	$<3,4\cdot10^{-4}$	249
				$\gamma\gamma$	$<4\cdot10^{-4}$	249
				$\pi^+\pi^-\pi^0$	$<8,5\cdot10^{-5}$	133
				$\pi^0\pi^0\pi^0$	$<3,7\cdot10^{-5}$	139

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	p, МэВ/с
K_L^0	$1/2\,(0^-)$	$m_{K_L} - m_{K_S} = 3{,}521\,(14) \times 10^{-12}$ МэВ	$5{,}183\,(40) \cdot 10^{-8}$	$\pi^0\pi^0\pi^0$	$(21{,}5 \pm 1{,}0)$ %, $S = 1{,}7$	139
				$\pi^+\pi^-\pi^0$	$(12{,}39 \pm 0{,}20)$ %, $S = 1{,}3$	133
				$\pi^\pm \mu^\mp \nu$	$(27{,}1 \pm 0{,}4)$ %, $S = 1{,}4$	216
				$\pi^\pm e^\mp \nu$	$(38{,}7 \pm 0{,}5)$ %, $S = 1{,}5$	229
				$\pi e \nu \gamma$	$(1{,}3 \pm 0{,}8)$ %	229
				$\pi^+\pi^-$	$(0{,}203 \pm 0{,}005)$ %, $S = 1{,}1$	206
				$\pi^0\pi^0$	$(0{,}094 \pm 0{,}018)$ %, $S = 1{,}5$	209
				$\pi^+\pi^-\gamma$	$(4{,}41 \pm 0{,}32) \cdot 10^{-5}$	206
				$\pi^0\gamma\gamma$	$< 2{,}4 \cdot 10^{-4}$	231
				$\gamma\gamma$	$(4{,}9 \pm 0{,}4) \cdot 10^{-4}$	249
				$e\mu$	$< 6 \cdot 10^{-6}$	238
				$\mu^+\mu^-$	$(9{,}1 \pm 1{,}9) \cdot 10^{-9}$	225
				$\mu^+\mu^-\gamma$	$(2{,}8 \pm 2{,}8) \cdot 10^{-7}$	225
				$\pi^0\mu^+\mu^-$	$< 1{,}2 \cdot 10^{-6}$	177
				e^+e^-	$< 2{,}0 \cdot 10^{-7}$	249
				$e^+e^-\gamma$	$(1{,}7 \pm 0{,}9) \cdot 10^{-5}$	249
				$\pi^0 e^+ e^-$	$< 2{,}3 \cdot 10^{-6}$	231
				$\pi^+\pi^- e^+ e^-$	$< 9 \cdot 10^{-6}$	206
				$\pi^0\pi^\pm e^\mp \nu$	$(6{,}2 \pm 2{,}0) \cdot 10^{-5}$	207
				$(\pi\mu$ атом$)\,\nu$	$(1{,}05 \pm 0{,}11) \cdot 10^{-7}$	—
			Очарованные нестранные мезоны			
$D^\pm$	$1/2\,(0^-)$	1869,4 (6) $m_{D^\pm} - m_{D^0} = 4{,}7 \pm 0{,}3$	$\left(9{,}2^{+1{,}7}_{-1{,}2}\right) \cdot 10^{-13}$	$D^+_\downarrow$ $(D^- \to CC)$		
				$e^\pm +$ всё	$0{,}19^{+0{,}04}_{-0{,}03}$	—
				$K^- +$ всё	$0{,}16\,(4)$	—
				$\overline{K}^0 + K^0 +$ всё	$0{,}48\,(15)$	—
				$K^+ +$ всё	$0{,}060\,(33)$	—
				$\eta +$ всё	$< 0{,}13$	—
				$K^-\pi^+\pi^+$	$0{,}046\,(11)$	845
				$K^-\pi^+\pi^+\pi^0$	$0{,}026^{+0{,}031}_{-0{,}010}$, $S = 1{,}3$	816
				$K^-\pi^+\pi^+\pi^+\pi^-$	$< 0{,}04$	772
				$\overline{K}^0\pi^+$	$0{,}018\,(5)$	862
				$\overline{K}^0\pi^+\pi^0$	$0{,}13\,(8)$	845
				$\overline{K}^0\pi^+\pi^+\pi^-$	$0{,}084\,(35)$	814
				$\overline{K}^0 K^+$	$0{,}0045\,(30)$	792
				$K^+K^-\pi^+$	$< 0{,}006$	744
				$K^+\pi^+\pi^-$	$< 0{,}0023$	845
				$\pi^+\pi^0$	$< 0{,}005$	925
				$\pi^+\pi^+\pi^-$	$< 0{,}004$	908
				$\overline{K}^{*0}\pi^+$	$< 0{,}037$	714
				$\mu^+\nu$	$< 0{,}02$	932
$D^0, \overline{D}^0$	$1/2\,(0^-)$	1864,7 (6)	$\left(4{,}4^{+0{,}8}_{-0{,}6}\right) \cdot 10^{-13}$	$D^0_\downarrow$ $(\overline{D}^0 \to CC)$		—
				$e^\pm +$ всё	$\left(5{,}3^{+2{,}9}_{-1{,}3}\right)$ %	

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	p, МэВ/c
				$K^- +$ всё	(44±10) %, $S = 1,3$	—
				$\overline{K}^0 + K^0 +$ всё	(33 ± 10) %	—
				$K^+ +$ всё	(8 ± 3) %	—
				$\eta +$ всё	< 13%	—
			$\frac{\Gamma(D^0 \to \overline{D}^0 \to K^+\pi^-)}{\Gamma(D^0 \to K\pi)} < 0,16$	$K^-\pi^+$	(2,4 ± 0,4) %	861
				$K^-\pi^+\pi^0$	(9,3 ± 2,8) %	844
				$K^-\pi^+\pi^+\pi^-$	(4,6 ± 1,4) %, $S = 1,2$	812
				$K^-\pi^+\pi^0\pi^0$	Обнаружен	815
				$\overline{K}^0\pi^0$	(2,2 ± 1,1) %	860
				$\overline{K}^0\pi^+\pi^-$	(4,2 ± 0,8) %	842
				$\pi^+\pi^-$	$(7,9 \pm 3,8)\cdot 10^{-4}$	922
				$\pi^+\pi^-\pi^-\pi^-$	< 1,0%	768
				K^+K^-	$(2,7 \pm 0,8)\cdot 10^{-3}$	791
				$K^{*-}\pi^+$	(3,4 ± 1,4) %	711
				$K^{*0}\pi^0$	$\left(1,4\ {}^{+2,3}_{-1,4}\right)$ %	711
				$K^-\rho^+$	$\left(7,2\ {}^{+3,0}_{-3,1}\right)$ %	679
				$\overline{K}^0\rho^0$	$\left(0,1\ {}^{+0,6}_{-0,1}\right)$ %	677
				$\overline{K}^{*0}\rho^0$	$\left(0,7\ {}^{+0,8}_{-0,7}\right)$ %	423
				$K^-\pi^+\rho^0$	$\left(3,9\ {}^{+1,3}_{-1,6}\right)$ %	613
				$\overline{K}^{*0}\pi^+\pi^-$	< 2,3%	685
				$K^-A_2^+$	0,8%	198
			Очарованный странный мезон			
$F^\pm$	0 (0^-)	1971 (6)	$\left(1,9\ {}^{+1,3}_{-0,7}\right)\cdot 10^{-13}$	$F^+_\downarrow$ ($F^- \to CC$)		
				$\varphi\pi^+$	Обнаружен	713
				$\eta\pi^+$	Возможно, обнаружен	903
				$\eta\pi^+\pi^+\pi^-$		857
				$\eta'\pi^+\pi^+\pi^-$		679
				$\rho^+\varphi$		411
			Прелестные мезоны			
$B^\pm$	1/2 (0^-)	5270,8 ± 3,0	—	$B^\times_\downarrow$ ($B^- \to CC$)		
				$\overline{D}^0\pi^+$	(4,2 ± 4,2) %	2303
				$D^{*-}\pi^+\pi^+$	(4,8 ± 3,0) %	2243
B^0, $\overline{B}^0$	1/2 (0^-)	5274,2 ± 2,8	—	$B^0_\downarrow$ ($\overline{B}^0 \to CC$)		
				$\overline{D}^0\pi^+\pi^-$	(13 ± 9) %	2298
				$D^{*-}\pi^+$	(2,6 ± 1,9) %	2253
$B^\pm$, B^0, $\overline{B}^0$ (без разделения)	—	—	$(14 \pm 4)\cdot 10^{-13}$	$e^\pm\nu +$ адроны	(13 ± 1,3) %	—
				$\mu^\pm\nu +$ адроны	(12,4 ± 3,5) %	—
				$D^0 +$ всё	(80 ± 28) %	—
				$K +$ всё	Обнаружен	—
				$p +$ всё	> 3,6 %	—

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)\,C_n$	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	p, МэВ/c
				Λ + всё	$> 2{,}2\%$	—
				e^+e^- + всё	$< 0{,}8\%$	—
				$\mu^+\mu^-$ + всё	$< 0{,}7\%$	—
			Нестранные барионы			
p	$1/2\,(1/2^+)$	$938{,}2796 \pm 0{,}0027$	Стабилен, $\tau \geqslant 10^{32}$ лет	—	—	—
n	$1/2\,(1/2^+)$	$939{,}5731 \pm 0{,}0027$ $m_p - m_n = -1{,}293323 \pm 0{,}000016$	898 ± 16	$pe^-\bar{\nu}$	100%	1,2
				$p\nu\bar{\nu}$	$< 9 \cdot 10^{-24}$	1,3
			Барионы со странностью $S = -1$			
Λ	$0\,(1/2^+)$	$1115{,}60 \pm 0{,}05$ $S = 1{,}2$ $m_\Lambda - m_{\Sigma^0} = -76{,}86\ (8)$	$2{,}632\ (20) \cdot 10^{-10}$ $S = 1{,}6$	$p\pi^-$	$(64{,}2 \pm 0{,}5)\ \%$	100
				$n\pi^0$	$(35{,}8 \pm 0{,}5)\ \%$	104
				$pe^-\nu$	$(8{,}37 \pm 0{,}14) \cdot 10^{-4}$	163
				$p\mu^-\nu$	$(1{,}57 \pm 0{,}35) \cdot 10^{-4}$	131
				$p\pi^-\gamma$	$(8{,}5 \pm 1{,}4) \cdot 10^{-4}$	100
Σ^+	$1\,(1/2^+)$	$1189{,}36 \pm 0{,}06$ $S = 1{,}8$ $m_{\Sigma^+} - m_{\Sigma^-} = -7{,}97\ (7)$ $S = 1{,}3$	$0{,}800\ (4) \cdot 10^{-10}$ $\frac{\Gamma(\Sigma^+ \to l^+ n\nu)}{\Gamma(\Sigma^- \to l^- n\nu)} < 0{,}04$	$p\pi^0$	$(51{,}64 \pm 0{,}30)\ \%$	189
				$n\pi^+$	$(48{,}36 \pm 0{,}30)\ \%$	185
				$p\gamma$	$(1{,}20 \pm 0{,}13) \times 10^{-3}$, $S = 1{,}2$	225
				$n\pi^+\gamma$	$(4{,}5 \pm 0{,}5) \cdot 10^{-4}$	185
				$\Lambda e^+\nu$	$(2{,}0 \pm 0{,}5) \cdot 10^{-5}$	71
				$n\mu^+\nu$	$< 3{,}0 \cdot 10^{-5}$	202
				$ne^+\nu$	$< 5 \cdot 10^{-6}$	224
				pe^+e^-	$< 7 \cdot 10^{-6}$	225
Σ^0	$1\,(1/2^+)$	$1192{,}46\ (8)$	$5{,}8\ (1{,}3) \cdot 10^{-20}$	$\Lambda\gamma$	100%	74
				Λe^+e^-	$5{,}45 \cdot 10^{-3}$	74
				$\Lambda\gamma\gamma$	$< 3\%$	74
Σ^-	$1\,(1/2^+)$	$1197{,}34\ (5)$ $m_{\Sigma^0} - m_{\Sigma^-} = -4{,}88$	$1{,}482\ (11) \cdot 10^{-10}$ $S = 1{,}3$	$n\pi^-$	100%	193
				$ne^-\nu$	$(1{,}022 \pm 0{,}034) \times 10^{-3}$	230
				$n\mu^-\nu$	$(0{,}45 \pm 0{,}04) \cdot 10^{-3}$	210
				$\Lambda e^-\nu$	$(5{,}74 \pm 0{,}27) \cdot 10^{-5}$	79
				$n\pi^-\gamma$	$(4{,}6 \pm 0{,}6) \cdot 10^{-4}$	193
			Барионы со странностью $S = -2$			
Ξ^0	$1/2\,(1/2^+)$	$1314{,}9\ (6)$ $m_{\Xi^0} - m_{\Xi^-} = -6{,}4\ (6)$	$2{,}90\ (10) \cdot 10^{-10}$	$\Lambda\pi^0$	100%	135
				$\Lambda\gamma$	$(0{,}5 \pm 0{,}5)\ \%$	184
				$\Sigma^0\gamma$	$< 7\%$	117
				$p\pi^-$	$< 3{,}6 \cdot 10^{-5}$	299
				$pe^-\nu$	$< 1{,}3 \cdot 10^{-3}$	323
				$\Sigma^+e^-\nu$	$< 1{,}1 \cdot 10^{-3}$	120
				$\Sigma^-e^+\nu$	$< 0{,}9 \cdot 10^{-3}$	112
				$\Sigma^+\mu^-\nu$	$< 1{,}1 \cdot 10^{-3}$	65
				$\Sigma^-\mu^+\nu$	$< 0{,}9 \cdot 10^{-3}$	49
				$p\mu^-\nu$	$< 1{,}3 \cdot 10^{-3}$	309

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя, МэВ	Среднее время жизни, с	Продукты распада	Относительная вероятность	p, МэВ/c
Ξ^-	$1/2(^1/_2{}^+)$	1321,32 (13)	$1{,}641\ (16)\cdot 10^{-10}$	$\Lambda\pi^-$	100%	139
				$\Lambda e^-\nu$	$(5{,}5 \pm 0{,}6)\cdot 10^{-4}$	190
				$\Sigma^0 e^-\nu$	$(8{,}7 \pm 1{,}7)\cdot 10^{-5}$	123
				$\Lambda\mu^-\nu$	$(3{,}5 \pm 3{,}5)\cdot 10^{-4}$	163
				$\Sigma^0\mu^-\nu$	$< 8\cdot 10^{-4}$	70
				$n\pi^-$	$< 1{,}9\cdot 10^{-5}$	303
				$ne^-\nu$	$< 3{,}2\cdot 10^{-3}$	327
				$n\mu^-\nu$	$< 1{,}5\%$	313
				$\Sigma^-\gamma$	$< 1{,}2\cdot 10^{-3}$	118
				$p\pi^-\pi^-$	$< 4\cdot 10^{-4}$	223
				$p\pi^- e^-\nu$	$< 4\cdot 10^{-4}$	304
				$p\pi^-\mu^-\nu$	$< 4\cdot 10^{-4}$	200
				$\Xi^0 e^-\nu$	$< 2{,}3\cdot 10^{-3}$	6
Барион со странностью $S = -3$						
Ω^-	$0\ (3/2^+)$	1672,45 (32)	$0{,}819\ (27)\cdot 10^{-10}$	ΛK^-	$(68{,}6 \pm 1{,}3)$ %	211
				$\Xi^0\pi^-$	$(23{,}4 \pm 1{,}3)$ %	294
				$\Xi^-\pi^0$	$(8{,}0 \pm 0{,}8)$ %	290
				$\Xi^0 e^-\nu$	$\sim 1\%$	319
				$\Xi^0(1530)\,\pi^-$	$\sim 2\cdot 10^{-3}$	—
				$\Lambda\pi^-$	$< 1{,}3\cdot 10^{-3}$	449
				$\Xi^-\gamma$	$< 3{,}1\cdot 10^{-3}$	314
Нестранный очарованный барион						
Λ_c^+	$0\ (1/2^+)$	2282,2 (3,1)	$\left(2{,}3\ ^{+1{,}0}_{-0{,}6}\right)\cdot 10^{-13}$	$pK^-\pi^+$	$(2{,}2 \pm 1{,}0)$ %	820
		$S = 1{,}8$		$p\overline{K}^0$	$(1{,}1 \pm 0{,}7)$ %	870
				$p\overline{K}^0\pi^+\pi^-$	$< 4\%$	751
				$\Lambda\pi^+$	$(0{,}6 \pm 0{,}5)$ %	861
				$\Lambda\pi^+\pi^+\pi^-$	$< 3{,}1\%$	804
				$\Sigma^0\pi^+$	Обнаружен	822
				pK^{*0}	$(0{,}48 \pm 0{,}30)$ %	681
				$\Delta^{++}K^-$	$(0{,}45 \pm 0{,}27)$ %	706
				$pK^{*-}\pi^+$	Обнаружен	575
				$e^+ +$ всё	$(4{,}5 \pm 1{,}7)$ %	—
				$pe^+ +$ все	$(1{,}8 \pm 0{,}9)$ %	—
				$\Lambda e^+ +$ всё	$(1{,}1 \pm 0{,}8)$ %	—
				$\Lambda +$ всё	(33 ± 29) %	—

Таблица 36.5. **Характеристики мезонных резонансов [5]**

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя M, МэВ	Полная ширина Γ, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
			Нестранные мезоны			
ρ (770)	$1^+(1^-)$ —	769 (3) для ρ^0	154 (5) для ρ^0	$\pi\pi$	~ 100	358
				$\pi\gamma$	$0{,}046 \pm 0{,}005$	372
				$\mu^+\mu^-$	$0{,}0067 \pm 0{,}0012$	370
				e^+e^-	$0{,}0046 \pm 0{,}0002$	384
				$\eta\gamma$	Обнаружен	189
ω (783)	$0^-(1^-)$ —	782,6 (2) $S = 1{,}1$	9,9 (3)	$\pi^+\pi^-\pi^0$	$89{,}9 \pm 0{,}5$	327
				$\pi^0\gamma$	$8{,}7 \pm 0{,}5$	380
				$\pi^+\pi^-$	$1{,}4 \pm 0{,}2$	366
				$\pi^0\mu^+\mu^-$	$0{,}010 \pm 0{,}002$	349
				e^+e^-	$0{,}0067 \pm 0{,}0004$, $S = 1{,}2$	391
η' (958)	$0^+(0^-)+$	957,57 (25)	0,29 (5)	$\eta\gamma$	Обнаружен	199
				$\eta\pi\pi$	$65{,}3 \pm 1{,}6$	231
				$\rho^0\gamma$	$30{,}0 \pm 1{,}6$	170
				$\omega\gamma$	$2{,}8 \pm 0{,}5$	159
				$\gamma\gamma$	$1{,}9 \pm 0{,}2$	479
				$\mu^+\mu^-\gamma$	$0{,}009 \pm 0{,}002$	467
S (975) или S^*	$0^+(0^+)+$	975 (4) $S = 1{,}4$	33 (6)	$\pi\pi$	78 ± 3	467
				$K\overline{K}$	22 ± 3	—
δ (980)	$1^-(0^+)+$	983 (2)	54 (7)	$\eta\pi$	Обнаружен	320
				$K\overline{K}$	Обнаружен	—
φ (1020)	$0^-(1^-)$ —	1019,5 (1) $S = 1{,}2$	4,22 (13)	K^+K^-	$49{,}3 \pm 1{,}0$, $S = 1{,}3$	127
				$K_L K_S$	$34{,}7 \pm 1{,}0$, $S = 1{,}3$	110
				$\pi^+\pi^-\pi^0$	$14{,}8 \pm 0{,}7$, $S = 1{,}2$	462
				$\eta\gamma$	$1{,}2 \pm 0{,}2$, $S = 1{,}4$	362
				$\pi^0\gamma$	$0{,}14 \pm 0{,}05$	501
				e^+e^-	$0{,}031 \pm 0{,}001$	510
				$\mu^+\mu^-$	$0{,}025 \pm 0{,}003$	499
				$\pi^+\pi^-$	$0{,}02 \pm 0{,}01$	490
H (1190)	$0^-(1^+)$ —	1190 (60)	320 (50)	$\rho\pi$	Обнаружен	327
B (1235)	$1^+(1^+)$ —	1234 (10)	150 (10)	$\omega\pi$	»	350
f (1270)	$0^+(2^+)+$	1274 (5)	178 (20)	$\pi\pi$	$84{,}3 \pm 1{,}2$	622
				$2\pi^+2\pi^-$	$2{,}9 \pm 0{,}4$, $S = 1{,}2$	559
				$K\overline{K}$	$2{,}9 \pm 0{,}2$	398
				$\gamma\gamma$	$0{,}0015 \pm 0{,}0002$	637
				$\pi^+\pi^-2\pi^0$	Обнаружен	562
A (1270) или A_1	$1^-(1^+)+$	1275 (30)	315 (45)	$\rho\pi$	Доминирует	389
				$\pi(\pi\pi)_{S\text{-волна}}$	$< 0{,}7$	599
D (1285)	$0^+(1^+)+$	1283 (5)	26 (5)	$K\overline{K}\pi$	11 ± 3	302
				$\eta\pi\pi$	49 ± 6	482
				4π (вероятно, $\rho\pi\pi$)	40 ± 7	564
				$\delta\pi$	36 ± 7	236
ε (1300)	$0^+(0^+)+$	~ 1300	200—600	$\pi\pi$	~ 90	635
				$K\overline{K}$	~ 10	418
				$\eta\eta$	Возможно, обнаружен	348
π (1300)	$1^-(0^-)+$	1300 ± 100	200—600	$\pi(\pi\pi)_{S\text{-волна}}$	Обнаружен	612
				$\rho\pi$		407
A_2 (1320)	$1^-(2^+)+$	1318 (5)	110 (5)	$\rho\pi$	$70{,}1 \pm 2{,}2$	419
				$\eta\pi$	$14{,}5 \pm 1{,}2$	534
				$\omega\pi\pi$	$10{,}6 \pm 2{,}5$	361
				$K\overline{K}$	$4{,}9 \pm 0{,}8$	434

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя M, МэВ	Полная ширина Γ, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
				$\eta'\pi$	< 2	286
				$\pi\gamma$	$0{,}27 \pm 0{,}06$	652
				$\gamma\gamma$	$0{,}0007 \pm 0{,}0002$	659
E (1420)	$0^+(1^+)+$	1418 (10)	52 (10)	$K\overline{K}\pi$ (включая $K^*\overline{K}+ + K\overline{K}^*$)	Обнаружен	423
				$\eta\pi\pi$	Возможно, обнаружен	565
				$\delta\pi$	Возможно, обнаружен	348
ι (1440)	$0^+(0^-)+$	1440 (10)	76 (10)	$K\overline{K}\pi$ (включая $K^*\overline{K}+ + K\overline{K}^*$)	Обнаружен	441
				$\eta\pi\pi$	Обнаружен	579
				$\delta\pi$	Обнаружен	366
f' (1525)	$0^+(2^+)+$	1525 (5)	70 (10)	$K\overline{K}$	Доминирует	578
				$\pi\pi$	Возможно, обнаружен	750
				$\gamma\gamma$	$0{,}0011 \pm 0{,}0002$	763
ρ (1600) или ρ'	$1^+(1^-)-$	1590 (20)	260 ± 100	4π (включая $\rho\pi^+\pi^-$, $A_1\pi$)	60 ± 7	733
				$\pi\pi$	23 ± 7	783
				$K^*\overline{K} + \overline{K}^*K$	9 ± 2	377
				$\eta\pi\pi$	7 ± 2	669
				$\overline{K}K$	$1 \pm 0{,}5$	623
				e^+e^-	$0{,}003 \pm 0{,}001$	795
ω (1670)	$0^-(3^-)-$	1668 (5)	166 (15) $S = 1{,}1$	3π	Обнаружен	806
				$\rho\pi$	Обнаружен	648
				5π	Обнаружен	740
				$\omega\pi\pi$ (вероятно, $B\pi$)	Обнаружен	616
A (1680) или A_3	$1^-(2^-)+$	1680 (30)	250 (50)	$f\pi$	53 ± 5	336
				$\rho\pi$	34 ± 6	656
				$\pi\,(\pi\pi)_{S\text{-волна}}$	9 ± 5	813
				$K^*\overline{K} + \overline{K}^*K$	$4 \pm 1{,}4$	459
φ (1680) или φ'	$0^-(1^-)-$	1685 (10)	150 (30)	$K^*\overline{K} + \overline{K}^*K$	Доминирует	466
				$\omega\pi\pi$	Обнаружен	624
				$K\overline{K}$	Обнаружен	683
				e^+e^-	Обнаружен	842
				$\pi^+\pi^-\pi^0$	Возможно, обнаружен	814
g (1690)	$1^+(3^-)-$	1691 (5)	200 (20)	2π	$23{,}8 \pm 1{,}3$	834
				4π (включая $\pi\pi\rho$, $\rho\rho$, $A_2\pi$, $\omega\pi$)	$70{,}9 \pm 1{,}9$	787
				$K\overline{K}\pi$ (включая $K^*\overline{K}+\overline{K}^*$)	$3{,}8 \pm 1{,}2$	625
				$K\overline{K}$	$1{,}5 \pm 0{,}3$	686
θ (1690)	$0^+(2^+)\pm$	1690 (30)	180 (50)	$\eta\eta$	Обнаружен	643
				$K\overline{K}$	Обнаружен	683
φ (1850)	$0^-(3^-)-$	1853 (10)	96 ± 32	$K\overline{K}$	Обнаружен	784
				$K^*\overline{K} + \overline{K}^*K$	Обнаружен	601
h (2030)	$0^+(4^+)+$	2027 (12)	220 (30)	$\pi\pi$	17 ± 2	1004
				$K\overline{K}$	$0{,}7^{+0{,}4}_{-0{,}2}$	883
η_c (2980)	$0^+(0^-)\pm$	2981 (6)	< 20	$\eta\pi^+\pi^-$	Обнаружен	1426
				$2\,(\pi^+\pi^-)$	Обнаружен	1458
				$K^+K^-\pi^+\pi^-$	Обнаружен	1343
				$p\overline{p}$	Обнаружен	1158

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя M, МэВ	Полная ширина Γ, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
J/ψ (3100)	$0^-(1^-)$ —	3096,9 (1)	0,063 (9)	e^+e^-	$7,4 \pm 1,2$	1548
				$\mu^+\mu^-$	$7,4 \pm 1,2$	1545
				Адроны + излучение	85 ± 2	—
				Распады в стабильные адроны		
				$2(\pi^+\pi^-)\,\pi^0$	$3,7 \pm 0,5$	1496
				$3(\pi^+\pi^-)\,\pi^0$	$2,9 \pm 0,7$	1433
				$\pi^+\pi^-\pi^0 K^+K^-$	$1,2 \pm 0,3$	1368
				$4(\pi^+\pi^-)\,\pi^0$	$0,9 \pm 0,3$	1345
				$\pi^+\pi^- K^+K^-$	$0,72 \pm 0,23$	1407
				$p\bar{p}\pi^+\pi^-$	$0,53 \pm 0,06$	1107
				$2(\pi^+\pi^-)$	$0,4 \pm 0,1$	1517
				$3(\pi^+\pi^-)$	$0,4 \pm 0,2$	1466
				$n\bar{n}\pi^+\pi^-$	$0,38 \pm 0,36$	1106
				$\Xi\bar{\Xi}$	$0,32 \pm 0,08$	818
				$2(\pi^+\pi^-)\,K^+K^-$	$0,31 \pm 0,13$	1320
				$K^0_S K^\pm \pi^\mp$	$0,26 \pm 0,07$	1440
				$\Sigma^+\bar{\Sigma}^-$	$0,24 \pm 0,26$	988
				$p\bar{p}\eta$	$0,23 \pm 0,04$	948
				$p\bar{p}$	$0,22 \pm 0,02$	1232
				$p\bar{n}\pi^-$ или $\bar{p}n\pi^+$	$0,21 \pm 0,02$	1174
				$n\bar{n}$	$0,18 \pm 0,09$	1231
				$p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$	$0,16 \pm 0,06$	1033
				$\Sigma^0\bar{\Sigma}^0$	$0,13 \pm 0,04$	988
				$\Lambda\bar{\Lambda}$	$0,11 \pm 0,02$	1074
				$p\bar{p}\pi^0$	$0,11 \pm 0,01$	1176
				$2(K^+K^-)$	$0,07 \pm 0,03$	1131
				K^+K^-	$0,022 \pm 0,008$	1468
				$\pi^+\pi^-$	$0,011 \pm 0,005$	1542
				$\Lambda\bar{\Sigma}$	$< 0,015$	1032
				$K^0_S K^0_L$	$< 0,009$	1466
				Распады в адронные резонансы		
				$\rho\pi$	$1,22 \pm 0,12$	1449
				$\omega 2\pi^+ 2\pi^-$	$0,85 \pm 0,34$	1392
				ρA_2	$0,84 \pm 0,45$	1126
				$\omega\pi\pi$	$0,68 \pm 0,19$	1435
				$K^{*0}(892)\ K^{*0}(1430)$ + + *с. с.*	$0,67 \pm 0,26$	1009
				$K^\pm K^*\mp(892)$	$0,34 \pm 0,05$	1373
				$B^\pm(1235)\,\pi^\mp$	$0,29 \pm 0,07$	1298
				$K^0\bar{K}^{*0}(892) \pm$ *с. с.*	$0,27 \pm 0,06$	1370
				ωf	$0,23 \pm 0,08$, $S=1,2$	1143
				$\varphi\pi^+\pi^-$	$0,21 \pm 0,09$	1365
				$\eta' p\bar{p}$	$0,18 \pm 0,08$	596

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя M, МэВ	Полная ширина Г, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
				$\varphi K\overline{K}$	$0{,}18 \pm 0{,}08$	1176
				$\omega p\overline{p}$	$0{,}16 \pm 0{,}03$	768
				$\omega K\overline{K}$	$0{,}16 \pm 0{,}10$	1265
				$\varphi\eta$	$0{,}10 \pm 0{,}06$	1320
				$\varphi f'$ (1525)	$0{,}037 \pm 0{,}013$	871
				φS (975)	$0{,}026 \pm 0{,}006$	1184
				$\pi^{\pm}A_2^{\mp}$	$< 0{,}43$	1263
				K^{*0} (1430) $\overline{K}^{*0}$ (1430)	$< 0{,}29$	606
				$K^0\overline{K}^{*0}$ (1430) + *с. с.*	$< 0{,}2$	1158
				$K^{\pm}K^{*\mp}$ (1430)	$< 0{,}2$	1159
				$\varphi 2\pi^+2\pi^-$	$< 0{,}15$	1318
				$\varphi\eta'$	$< 0{,}13$	1192
				K^{*0} (892) $\overline{K}^{*0}$ (892)	$< 0{,}05$	1261
				φf	$< 0{,}037$	1037
				$\omega f'$ (1525)	$< 0{,}016$	1003
				Радиационные распады		
				$\gamma 2(\pi^+\pi^-)$	$0{,}49 \pm 0{,}17$	1517
				$\gamma\rho\rho$	Обнаружен	1344
				$\gamma\iota$ (1440) $\rightarrow \gamma K\overline{K}\pi$	$0{,}42 \pm 0{,}12$	1214
				$\gamma\eta'$	$0{,}36 \pm 0{,}05$	1400
				γf	$0{,}15 \pm 0{,}04$	1286
				$\gamma\eta$	$0{,}086 \pm 0{,}009$	1500
				$\gamma\pi^0$	$0{,}007 \pm 0{,}005$	1546
				$\gamma\eta_c$ (2980)	Обнаружен	114
				$\gamma\Theta$ (1690)	Обнаружен	1087
				$\gamma\eta\pi\pi$	Обнаружен	1487
				γD (1285)	$< 0{,}6$	1283
				2γ	$< 0{,}05$	1548
				$\gamma f'$ (1525)	$< 0{,}03$	1173
				$\gamma p\overline{p}$	$< 0{,}01$	1232
				3γ	$< 0{,}006$	1548
χ (3415)	$0^+(0^+)+$	3415 (1)	—	$2(\pi^+\pi^-)$ (включая $\pi\pi\rho$)	$4{,}3 \pm 0{,}9$	1679
				$\pi^+\pi^-K^+K^-$ (включая $\pi K\overline{K}^*$)	$3{,}4 \pm 0{,}9$	1580
				$3(\pi^+\pi^-)$	$1{,}7 \pm 0{,}6$	1633
				$\pi^+\pi^-$	$0{,}9 \pm 0{,}2$	1702
				$\gamma J/\psi$ (3100)	$0{,}8 \pm 0{,}3$	303
				K^+K^-	$0{,}8 \pm 0{,}2$	1635
				$p\overline{p}\pi^+\pi^-$	$0{,}6 \pm 0{,}2$	1320
χ (3510)	$0^+(1^+)+$	3510,0 (6)	—	$\gamma(J/\psi)$ (3100)	28 ± 3	389
				$3(\pi^+\pi^-)$	$2{,}4 \pm 0{,}9$	1683
				$2(\pi^+\pi^-)$ (включая $\pi\pi\rho$)	$1{,}8 \pm 0{,}5$	1727

Примечание. *с. с.* — зарядово-сопряженная пара частиц; *с. с.* = $\overline{K}^0K^{*0}$ (1430).

Частица	Квантовые числа $J^G(J^P)C_n$	Масса покоя, M, МэВ	Полная ширина Γ, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
				$\pi^+\pi^-K^+K^-$ (включая $\pi K\overline{K}^*$)	$1,0 \pm 0,4$	1632
				$\pi^+\pi^-p\overline{p}$	$0,15 \pm 0,10$	1381
χ (3555)	$0^+(2^+)+$	3555,8 (6)	—	$\gamma(J/\psi)$ (3100)	$15,5 \pm 1,8$	429
				$2(\pi^+\pi^-)$ (включая $\pi\pi\rho$)	$2,3 \pm 0,5$	1750
				$\pi^+\pi^-K^+K^-$ (включая $\pi K\overline{K}^*$)	$2,0 \pm 0,5$	1656
				$3(\pi^+\pi^-)$	$1,2 \pm 0,8$	1706
				$\pi^+\pi^-p\overline{p}$	$0,35 \pm 0,14$	1410
				$\pi^+\pi^-$	$0,20 \pm 0,11$	1772
				K^+K^-	$0,16 \pm 0,12$	1708
ψ (3685)	$0^-(1^-)-$	$3686,0 \pm 0,1$ $m_{\psi(3685)} - m_{\psi(3100)} = 589,06(13)$	$0,215 \pm 0,040$	e^+e^-	$0,9 \pm 0,1$	1843
				$\mu^+\mu^-$	$0,8 \pm 0,2$	1840
				Адроны + излучение	$98,1 \pm 0,3$	—
				Распады в адроны		
				$(J/\psi)\,\pi^+\pi^-$	33 ± 2	477
				$(J/\psi)\,\pi^0\pi^0$	17 ± 2	481
				$(J/\psi)\,\eta$	$2,8 \pm 0,6$	196
				$2(\pi^+\pi^-)\,\pi^0$	$0,35 \pm 0,15$	1799
				$\pi^+\pi^-K^+K^-$	$0,16 \pm 0,04$	1726
				$(J/\psi)\,\pi^0$	$0,10 \pm 0,03$	528
				$p\overline{p}\pi^+\pi^-$	$0,08 \pm 0,02$	1491
				$K^{*0}(892)\,K^-\pi^+ + \text{с.с}$	$0,067 \pm 0,025$	1674
				$2(\pi^+\pi^-)$	$0,05 \pm 0,01$	1817
				$\rho^0\pi^+\pi^-$	$0,042 \pm 0,015$	1751
				$p\overline{p}$	$0,019 \pm 0,005$	1586
				$3(\pi^+\pi^-)$	$0,015 \pm 0,010$	1774
				K^+K^-	$0,010 \pm 0,007$	1776
				$\pi^+\pi^-$	$0,008 \pm 0,005$	1838
				$\rho\pi$	$< 0,1$	1760
				$\Lambda\overline{\Lambda}$	$< 0,04$	1467
				Радиационные распады		
				$\gamma\chi$ (3415)	$8,2 \pm 1,4$	261
				$\gamma\chi$ (3510)	$8,0 \pm 1,3$	172
				$\gamma\chi$ (3555)	$7,4 \pm 1,3$	128
				$\gamma\eta_c$ (2980)	$0,43 \pm 0,26$	638
				$\gamma\eta_c'$ (3590)	От 0,2 до 1,3	91
				$\gamma\pi^0$	$< 0,5$	1841
				$\gamma\eta$	$< 0,02$	1802
				$\gamma\eta'$	$< 0,02$	1719
				$\gamma\iota(1440) \to \gamma K\overline{K}\pi$	$< 0,012$	1562

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя M, МэВ	Полная ширина Γ, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
ψ (3770)	$\underline{(1^-)-}$	3770 (3) $m_{\psi(3770)} - m_{\psi(3685)} = 83{,}9\ (2{,}4)$ $S = 1{,}8$	25 (3)	e^+e^- $D\overline{D}$	$0{,}0011 \pm 0{,}0002$ Доминирует	1885 242
ψ (4030)	$\underline{(1^-)-}$	4030 (5)	52 (10)	e^+e^- Адроны $D\overline{D}$ $D\overline{D}^* + D^*\overline{D}$ $D^*\overline{D}^*$	$0{,}0014 \pm 0{,}0004$ Доминируют Обнаружен	2015 — 752 559 177
ψ (4160)	$(1^-)-$	4159 (20)	78 (20	e^+e^- Адроны	$0{,}0010 \pm 0{,}0004$ Доминируют	2079 —
ψ (4415)	$\underline{(1^-)-}$	4415 (6)	43 (20)	e^+e^- Адроны	$0{,}0010 \pm 0{,}0003$ Доминируют	2207 —
Υ (9460) или Υ (1S)	$\underline{(1^-)-}$	9460,0 (3) $S = 1{,}6$	0,0443 (66)	$\mu^+\mu^-$ e^+e^- $\tau^+\tau^-$	$2{,}9 \pm 0{,}5$ $2{,}5 \pm 0{,}5$ $3{,}4 \pm 0{,}8$	4729 4730 4381
χ_b (9875) или $\chi_b(1^3P_0)$	$(\ )+$	9872,9 (5,8)	—	$\gamma\Upsilon$ (9460)	Обнаружен	404
χ_b (9895) или $\chi_b(1^3P_1)$	$(\ )+$	9894,5 (3,5)	—	$\gamma\Upsilon$ (9460)	43 ± 11	425
χ_b (9915) или $\chi_b(1^3P_2)$	$(\ )+$	9914.6 (2.4)	—	$\gamma\Upsilon$ (9460)	$20{,}0 \pm 4{,}4$	444
Υ (10025) или Υ (2S)	$\underline{(1^-)-}$	10023,4 (3) $m_{\Upsilon(10025)} - m_{\Upsilon(9460)} = 563{,}3\ (4)$	0,0296 (47)	$\mu^+\mu^-$ e^+e^- Υ (9460) $\pi\pi$ $\gamma\chi_b$ (9875) $\gamma\chi_b$ (9895) $\gamma\chi_b$ (9915)	$1{,}9 \pm 1{,}8$ $1{,}6 \pm 0{,}3$ $19{,}5 \pm 1{,}7$ $3{,}5 \pm 1{,}4$ $5{,}9 \pm 1{,}4$ $6{,}1 \pm 1{,}4$	5011 5012 476 149 128 108
χ_b (10255) или $\chi_b(2^3P_1)$	$(\ )+$	10253,7 (3,4)	—	$\gamma\Upsilon$ (9460) $\gamma\Upsilon$ (10025)	Обнаружен	763 228
χ_b (10270) или $\chi_b(2^3P_2)$	$(\ )+$	10271,0 (2,4)	—	$\gamma\Upsilon$ (9460) $\gamma\Upsilon$ (10025)	Обнаружен	779 245
Υ (10355) или Υ (3S)	$\underline{(1^-)-}$	10355,5 (5) $m_{\Upsilon(10355)} - m_{\Upsilon(9460)} = 895{,}5\ (6)$	0,0177 (51)	e^+e^- $\mu^+\mu^-$ Υ (9460) $\pi^+\pi^-$ Υ (10025) $\pi^+\pi^-$ $\gamma\chi_b$ (10235) $\gamma\chi_b$ (10255) $\gamma\chi_b$ (10270)	$2{,}0 \pm 0{,}7$ $3{,}3 \pm 2{,}0$ $5{,}1 \pm 1{,}1$ 3 ± 3 $7{,}6 \pm 3{,}5$ $15{,}6 \pm 4{,}2$ $12{,}7 \pm 4{,}1$	5178 5177 814 177 122 101 84
Υ (10575) или Υ (4S)	$\underline{(1^-)-}$	10573 (4) $m_{\Upsilon(10575)} - m_{\Upsilon(9460)} = 1113\ (4)$	14 (5)	e^+e^-	$0{,}0017 \pm 0{,}0007$	5286

Частица	Квантовые числа $I^G(J^P)C_n$	Масса покоя M, МэВ	Полная ширина Γ, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
			Странные мезоны			
K^* (892)	$\underline{1/2\,(1^-)}$	892,1 (4) $S = 1,4$ $m^0 - m^\pm = 6,7 \pm 1,2$ МэВ	51,3 (1,0) $S = 1,1$	$K\pi$ $K\gamma$ $K\pi\pi$	~ 100 $0,10 \pm 0,01$ $< 0,05$	288 309 216
Q (1280) или Q_1	$\underline{1/2\,(1^+)}$	1270 (10)	90 ± 20	$K\rho$ k (1350) π K (892) π $K\omega$ $K\varepsilon$	42 ± 6 28 ± 4 16 ± 5 11 ± 2 3 ± 2	45 — 298 — —
k (1350)	$\underline{1/2\,(0^+)}$	~ 1350	~ 250	$K\pi$	Обнаружен	574
Q (1400) или Q_2	$\underline{1/2\,(1^+)}$	1406 (10)	184 (9)	K^* (892) π $K\rho$ $K\varepsilon$ $K\omega$	94 ± 6 3 ± 3 2 ± 2 1 ± 1	403 299 — 285
K^* (1430)	$1/2\,(2^+)$	1425 (5)	100 (10)	$K\pi$ K^* (892) π K^* (892) $\pi\pi$ $K\rho$ $K\omega$ $K\eta$ $K\gamma$	$44,8 \pm 2,3$, $S=2,7$ $24,5 \pm 2,0$, $S=1,1$ $13,0 \pm 2,6$, $S = 1,1$ $8,8 \pm 1,0$ $S = 1,2$ $4,2 \pm 1,5$ 5 ± 5 $0,24 \pm 0,05$	618 417 366 324 310 485 627
L (1770)	$\underline{1/2\,(2^-)}$	~ 1770	~ 200	K^* (1430) π K^* (892) π Kf $K\varphi$	Доминирует Обнаружен	286 651 — 816
K^* (1780)	$\underline{1/2\,(3^-)}$	1780 (10)	160 (20)	$K\pi\pi$ $K\rho$ K^* (892) π $K\pi$	Велика 17 ± 5	796 620 657 815
K^* (2060)	$\underline{1/2\,(4^+)}$	2060 (30)	210 ± 40	$K\pi$ K^* (892) $\pi\pi$ $\rho K\pi$ $\omega K\pi$ K^* (892) $\pi\pi\pi$	7 ± 1 Обнаружен	966 809 751 744 775
			Очарованные нестранные мезоны			
D^{*+} (2010)	$1/2\,(1^-)$	2010,1 (7) $m_{D^{*+}} - m_{D^0} = 145,4 \pm 0,2$ МэВ	$< 2,0$	$D^0\pi^+$ $D^+\pi^0$ $D^+\gamma$	64 ± 11 28 ± 9 8 ± 7	39 38 136
D^{*0} (2010)	$1/2\,(1^-)$	2007,2 (2,1)	< 5	$D^0\pi^0$ $D^0\gamma$	55 ± 15 45 ± 15	44 137

Таблица 36.6. **Характеристики барионных резонансов [5]**

Частица	Квантовые числа $I\,(J^P)\,L_{2I,\,2J}$	Импульс пучка, ГэВ/c	Масса покоя M, МэВ	Полная ширина Γ, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
			Нуклонные резонансы N, $S = 0$, $I = 1/2$				
$N(1440)$	$1/2\,(1/2^+)\,P'_{11}$	0,61	1400—1480	1200—350 (200)	$N\pi$	50—70	397
					$N\eta$	8—18	—
					$N\pi\pi$	~30	342
					$\Delta\pi$	12—28	143
					$N\rho$	~7	—
					$N\varepsilon$	~5	—
$N(1520)$	$1/2\,(3/2)^-)D'_{13}$	0,74	1510—1530	100—140 (125)	$N\pi$	50—60	456
					$N\eta$	~0,1	149
					$N\pi\pi$	35—50	410
					$\Delta\pi$	15—25	228
					$N\rho$	15—25	—
					$N\varepsilon$	<5	—
$N(1535)$	$1/2\,(1/2^-)\,S'_{11}$	0,76	1520—1560	100—250 (150)	$N\pi$	35—50	467
					$N\eta$	~35	182
					$N\pi\pi$	~5	422
					$\Delta\pi$	~1	242
					$N\rho$	~3	—
					$N\varepsilon$	~2	—
$N(1650)$	$1/2\,(1/2^-)\,S''_{11}$	0,96	1620—1680	100—200 (150)	$N\pi$	55—65	547
					$N\eta$	~1,5	346
					ΛK	~8	161
					ΣK	3—10	—
					$N\pi\pi$	~30	511
					$\Delta\pi$	4—15	344
					$N\rho$	~20	—
					$N\varepsilon$	<5	—
$N(1675)$	$1/2\,(5/2^-)\,D'_{15}$	1,01	1660—1690	120—180 (155)	$N\pi$	30—40	563
					$N\eta$	~1	374
					ΛK	~0,1	209
					$N\pi\pi$	55—70	529
					$\Delta\pi$	50—65	364
					$N\rho$	~5	—
$N(1680)$	$1/2\,(5/2^+)\,F'_{15}$	1,01	1670—1690	110—140 (125)	$N\pi$	55—65	567
					$N\eta$	<1	379
					$N\pi\pi$	~40	532
					$\Delta\pi$	~12	369
					$N\rho$	~10	—
					$N\varepsilon$	~20	—
$N(1700)$	$1/2\,(3/2^-)\,D''_{13}$	1,05	1670—1730	70—120 (100)	$N\pi$	8—12	580
					$N\eta$	~4	400
					ΛK	~0,2	250
					$N\pi\pi$	~85	547
					$\Delta\pi$	15—40	385
					$N\rho$	~5	—
					$N\varepsilon$	<40	—
$N(1710)$	$1/2\,(1/2^+)\,P''_{11}$	1,07	1680—1740	90—130 (110)	$N\pi$	10—20	587
					$N\eta$	~25	410
					ΛK	~15	264
					ΣK	2—10	138
					$N\pi\pi$	>50	554
					$\Delta\pi$	10—25	393
					$N\rho$	25—65	48
					$N\varepsilon$	15—40	—

Частица	Квантовые числа $I(J^P) L_{2I,2J}$	Импульс пучка, ГэВ/c	Масса покоя M, МэВ	Полная ширина Γ, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
$N(1720)$	$1/2\,(3/2^+)\,P_{13}''$	1,09	1690—1800	125—250 (200)	$N\pi$	10—20	594
					$N\eta$	~3,5	420
					ΛK	~5	278
					ΣK	2—5	162
					$N\pi\pi$	~70	561
					$\Delta\pi$	~20	401
					$N\rho$	45—70	104
					$N\varepsilon$	~20	—
$N(2190)$	$1/2\,(7/2^-\,G_{17})$	2,07	2120—2230	200—500 (350)	$N\pi$	~ 14	888
					$N\eta$	~3	790
					ΛK	~0,3	712
$N(2220)$	$1/2\,(9/2^+)\,H_{19}$	2,14	2150—2300	300—500 (400)	$N\pi$	~18	905
					$N\eta$	~0,5	811
					ΛK	~0,2	732
$N(2250)$	$1/2\,(9/2^-)\,G_{19}'$	2,21	2130—2270	200—500 (300)	$N\pi$	~10	923
					$N\eta$	~2	831
					ΛK	~0,3	754
$N(2600)$	$1/2\,(11/2^-)\,I_{111}$	3,12	2580—2700	>300 (400)	$N\pi$	~5	1126
			Дельта-резонансы Δ, $S=0$, $I=3/2$				
$\Delta(1232)$	$3/2\,(3/2^+)\,P_{33}'$	0,30	1230—1234	110—120 (115)	$N\pi$	99,4	227
					$N\gamma$	0,6	259
$\Delta(1620)$	$3/2\,(1/2^-)\,S_{31}'$	0,91	1600—1650	120—160 (140)	$N\pi$	25—35	526
					$N\pi\pi$	~70	488
					$\Delta\pi$	35—50	318
					$N\rho$	<40	—
$\Delta(1700)$	$3/2\,(3/2^-)\,D_{33}'$	1,05	1630—1740	190—300 (250)	$N\pi$	10—20	580
					$N\pi\pi$	~85	547
					$\Delta\pi$	<50	385
					$N\rho$	~40	—
$\Delta(1900)$	$3/2\,(1/2^-)\,S_{31}''$	1,44	1850—2000	130—300 (150)	$N\pi$	6—12	710
					ΣK	~10	410
$\Delta(1905)$	$3/2\,(5/2^+)\,F_{35}$	1,45	1890—1920	250—400 (300)	$N\pi$	8—15	713
					ΣK	<3	415
					$N\pi\pi$	~80	687
					$\Delta\pi$	10—30	542
					$N\rho$	~60	421
$\Delta(1910)$	$3/2\,(1/2^+)\,P_{31}''$	1,46	1850—1950	200—330 (220)	$N\pi$	20—25	716
					ΣK	2—20	421
					$N\pi\pi$	>40	691
					$\Delta\pi$	Мала	545
					$N\rho$	<40	426
$\Delta(1920)$	$3/2\,(3/2^+)\,P_{33}'''$	1,48	1860—2160	190—300 (250)	$N\pi$	14—20	722
					ΣK	~5	431
$\Delta(1930)$	$3/2\,(5/2^-)\,D_{35}'$	1,50	1890—1960	150—350 (250)	$N\pi$	4—14	729
					ΣK	<10	441

Частица	Квантовые числа $I(J^P)L_{2I,2J}$	Импульс пучка, ГэВ/c	Масса покоя M, МэВ	Полная ширина Γ, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
Δ (1950)	$3/2\,(7/2^+)\,F'_{37}$	1,54	1910—1960	200—340 (240)	ΣK	<1	460
					$N\pi$	35—45	741
					$N\pi\pi$	~ 60	716
					$\Delta\pi$	~ 40	574
					$N\rho$	~ 20	469
Δ (2420)	$3/2\,(11/2^+)\,H_{311}$	2,64	2380—2450	300—500 (300)	$N\pi$	5—15	1023
	$I(J^P)L_{I,2I}$	*Ламбда-резонансы* Λ, $S=-1$, $I=0$					
Λ (1405)	$0\,(1/2^-)\,S'_{01}$	Ниже (K^-p)-порога	1405±5	40±10	$\Sigma\pi$	100	152
Λ (1520)	$0\,(3/2^-)\,D'_{03}$	0,395	1519±1,0	15,6±1,0	$N\overline{K}$	45 (1)	244
					$\Sigma\pi$	42 (1)	267
					$\Lambda\pi\pi$	10 (1)	252
					$\Sigma\pi\pi$	0,9 (0,1)	152
					$\Lambda\gamma$	0,8 (0,2)	351
Λ (1600)	$0\,(1/2^+)\,P'_{01}$	0,58	1560—1700	50—250 (150)	$N\overline{K}$	15—30	343
					$\Sigma\pi$	10—60	336
Λ (1670)	$0\,(1/2^-)\,S''_{01}$	0,74	1660—1680	25—50 (35)	$N\overline{K}$	15—25	414
					$\Sigma\pi$	20—60	393
					$\Lambda\eta$	15—35	64
Λ (1690)	$0\,(3/2^-)\,D''_{03}$	0,78	1685—1695	50—70 (60)	$N\overline{K}$	20—30	433
					$\Sigma\pi$	20—40	409
					$\Lambda\pi\pi$	~ 25	415
					$\Sigma\pi\pi$	~ 20	350
Λ (1800)	$0\,(1/2^-)\,S'''_{01}$	1,01	1720—1850	200—400 (300)	$N\overline{K}$	25—40	528
					$\Sigma\pi$		493
					$\Sigma(1385)\,\pi$	Обнаружен	345
					$N\overline{K}^*$ (892)		—
Λ (1800)	$0\,(1/2^+)\,P''_{01}$	1,01	1750—1850	50—250 (150)	$N\overline{K}$	20—50	528
					$\Sigma\pi$	10—40	493
					$\Sigma\,(1385)\,\pi$	Обнаружен	345
					$N\overline{K}^*$ (892)	30—60	—
Λ (1820)	$0\,(5/2^+)\,F'_{05}$	1,06	1815—1825	70—90 (80)	$N\overline{K}$	55—65	545
					$\Sigma\pi$	8—14	508
					$\Sigma\,(1385)\,\pi$	5—10	362
Λ (1830)	$0\,(5/2^-)\,D_{05}$	1,08	1810—1830	60—110 (95)	$N\overline{K}$	3—10	553
					$\Sigma\pi$	35—75	515
					$\Sigma\,(1385)\,\pi$	>15	371
Λ (1890)	$0\,(3/2^+)\,P'_{03}$	1,21	1850—1910	60—200 (100)	$N\overline{K}$	20—35	599
					$\Sigma\pi$	3—10	559
					$\Sigma\,(1385)\,\pi$	Обнаружен	420
					NK^* (892)		233
Λ (2100)	$0\,(7/2^-)\,G_{07}$	1,68	2090—2110	100—250 (200)	$N\overline{K}$	25—35	751
					$\Sigma\pi$	~ 5	704
					$\Lambda\eta$	<3	617
					ΞK	<3	483
					$\Lambda\omega$	<8	443
					$N\overline{K}^*$ (892)	10—20	514

Частица	Квантовые числа $I\left(J^P\right) L_{2I,2J}$	Импульс пучка, ГэВ/c	Масса покоя M, МэВ	Полная ширина Γ, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
Λ (2110)	0 $(5/2^+)$ F_{05}''	1,70	2090—2140	150—250 (200)	$N\overline{K}$	5—25	757
					$\Sigma\pi$	10—40	711
					$\Lambda\omega$	Обнаружен	455
					Σ (1385) π	Обнаружен	589
					$N\overline{K}^*$(892)	10—60	524
Λ (2350)	0$(9/2^+)$	2,29	2340—2370	100—250 (150)	$N\overline{K}$	$\sim$12	915
					$\Sigma\pi$	$\sim$10	867
			Сигма-резонансы Σ, $S=-1$, $I=1$				
Σ (1385)	1 $(3/2^+)$ P_{13}'	Ниже(K^-p)-порога	(+) 1382,3 (0,4), S=1,6 (0) 1382,0 (2,5), S=1,6 (—) 1387,4 (0,6), S=2,2	35(1), S=1,0 $\sim$35	$\Lambda\pi$	88 (2)	208
					$\Sigma\pi$	12 (2)	127
				40 (2), S=1,9			
Σ (1660)	1 $(1/2^+)$ P_{11}'	0,72	1630—1690	40—200 (100)	$N\overline{K}$	10—30	405
					$\Lambda\pi$	Обнаружен	439
					$\Sigma\pi$	Обнаружен	385
Σ (1670)	1 $(3/2^-)$ D_{13}''	0,74	1665—1685	40—80 (60)	$N\overline{K}$	7—13	414
					$\Lambda\pi$	5—15	447
					$\Sigma\pi$	30—60	393
Σ (1750)	1 $(1/2^-)$ S_{11}''	0,91	1730—1800	60—160 (90)	$N\overline{K}$	10—40	486
					$\Lambda\pi$	Обнаружен	507
					$\Sigma\pi$	$<$8	455
					$\Sigma\eta$	15—55	81
Σ (1775)	1 $(5/2^-)$ D_{15}	0,96	1770—1780	105—135 (120)	$N\overline{K}$	37—43	508
					$\Lambda\pi$	14—20	525
					$\Sigma\pi$	2—5	474
					Σ (1385) π	8—12	324
					Λ (1520) π	17—23	198
Σ (1915)	1 $(5/2^+)$ F_{15}'	1,26	1900—1935	80—160 (120)	$N\overline{K}$	5—15	618
					$\Lambda\pi$	Обнаружен	622
					$\Sigma\pi$	Обнаружен	577
					Σ (1385) π	$<$5	440
Σ (1940)	1 $(3/2^-)$ D_{13}'''	1,32	1900—1950	150—300 (220)	$N\overline{K}$	$<$20	637
					$\Lambda\pi$	Обнаружен	639
					$\Sigma\pi$	Обнаружен	594
					Σ (1385) π	Обнаружен	460
					Λ (1520) π	Обнаружен	354
					Δ (1232) $\overline{K}$	Обнаружен	410
					$N\overline{K}$ * (892)	Обнаружен	320
Σ (2030)	1 $(7/2^+)$ F_{17}	1,52	2025—2040	150—200 (180)	$N\overline{K}$	17—23	702
					$\Lambda\pi$	17—23	700
					$\Sigma\pi$	5—10	657
					ΞK	$<$2	412
					Σ (1385) π	5—15	529
					Λ (1520) π	10—20	430
					Δ (1232) $\overline{K}$	10—20	498
					$N\overline{K}^*$(892)	$<$5	438

Частица	Квантовые числа $I(J^P)L_{2I,2J}$	Импульс пучка, ГэВ/c	Масса покоя M, МэВ	Полная ширина Γ, МэВ	Продукты распада	Относительная вероятность, %	p, МэВ/c
Σ (2250)	1 (?)	2,04	2210—2280	60—150 (100)	$N\overline{K}$	<10	851
					$\Lambda\pi$	Обнаружен	842
					$\Sigma\pi$	Обнаружен	803
	$I(J^P)L_{2I,2J}$	*Каскадные резонансы* Ξ, $S=-2$, $I=1/2$					
Ξ (1530)	$1/2\,(3/2^+)\,P_{13}$	—	(0) 1531,8 (0,3) $S=1,3$ (—) 1535,0(0,6)	9,1 (0,5) 10,1 (1,9)	$\Xi\pi$	100	148
Ξ (1820)	1/2 (3/2)	—	1823 (6)	$20\ ^{+15}_{-10}$	$\Lambda\overline{K}$	~45	396
					$\Sigma\overline{K}$	~10	306
					$\Xi\pi$	Мала	413
					Ξ (1530) π	~45	231
Ξ (2030)	1/2 (?)	—	2024 (6)	$16\ ^{+15}_{-5}$	$\Lambda\overline{K}$	~20	587
					$\Sigma\overline{K}$	~80	524
					$\Xi\pi$	Мала	573
					Ξ (1530) π	Мала	418

ет, что в данном столбце таблицы приведены каналы распада частицы $a^-(a^-=\mu^-,\ \tau^-$ и т. п.), которые представляют собой также каналы распада частицы $a^+(a^+=\mu^+,\ \tau^+$ и т. п.) после замены всех продуктов распада зарядово-сопряженными.

В тех случаях, когда среднее время жизни указано через массу частицы, для получения времени жизни частицы в секундах необходимо подставить ее массу в мегаэлектрон-вольтах. Иногда вместо среднего времени жизни приводится средняя ширина состояиия Γ в энергетических единицах.

36.7. МЕЗОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ

Зарядовая четиость нейтральных мезонных резоиансов с нулевыми страниостью, очарованием и другими характернстиками, входящих в состав изотопического мультиплета, обозначается символом C_n. Надежно установленные квантовые числа мезонных резоиансов в табл. 36.5 подчеркнуты; отсутствие черты означает, что указаниые квантовые числа наиболее вероятны. Цифры в скобках после символа частицы, например K^* (892), означают массу частицы в мегаэлектрон-вольтах и служат для идентификации данной частицы. Остальные обозначения те же, что в табл. 36.4.

36.8. БАРИОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ

В табл. 36.6 в колоике «Импульс пучка» приведены значения импульса p первичных частиц (π- или K-мезонов), отвечающие образованию соответствующего барионного резонанса в $\pi\ (K)p$-соударения в лабораторной системе отсчета. Символ $L_{2I,\,2J}$ является спектроскопическим обозначением барионных резонансов со странностью $S=0$, -2; символ $L_{I,\,2J}$ — спектроскопическнм обозиачением барионных резонансов со страниостью $S=-1$; L — символ орбитального состояния мезоиа и бариона, сбразующих данный резонанс, причем символам S, P, D, F ... отвечают значения орбитального квантового числа $L=0$, 1, 2, 3 ... соответственно. Штрихами при спектроскопическом символе различают состояния с одинаковыми кваитовыми числами. В колоике «Полная ширина Г» в скобках приводится предпочтительное значение этого параметра. Остальные пояснения те же, что в § 36.6, 36.7.

36.9. МАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

$\mu_B=e\hbar/(2m_e\,C)=0,57883785\cdot10^{-10}$ МэВ/Тл — магнетон Бора для электрона;

$\mu_\mu=e\hbar/(2m_\mu c)=0,2799541\cdot10^{-12}$ МэВ/Тл — магнетон Бора для мюона;

$\mu_N=e\hbar/(2m_p c)=3,1524515\cdot10^{-14}$ МэВ/Тл — ядериый магнетон Бора.

Частица	Магнитиый момент [5]
e	1,001159652209 (31) μ_B
μ	1,001165924 (9) μ_μ
p	2,7928456 (11) μ_N
n	—1,91304184 (88) μ_N
Λ	—0,613 (4) μ_N
Σ^+	2,379 (20) μ_N
Σ^-	—1,10 (5) μ_N
Ξ^0	—1,250 (14) μ_N
Ξ^-	—1,85 (75) μ_N

Таблица 36.7. **Параметры распада элементарных частиц**

Схема распада	α	φ, град	γ	Δ, град
$\Lambda \to p\pi^-$	0,642±0,013	−6,5±3,5	0,76	7,7±4,1
$\Lambda \to n\pi^0$	0,646±0,044	—	—	—
$\Sigma^+ \to p\pi^0$	−0,979±0,016	36±34	0,17	187±6
$\Sigma^+ \to n\pi^0$	0,068±0,013	167±20	0,97	-73^{+134}_{-10}
$\Sigma^+ \to p\gamma$	−0,72±0,29	—	—	—
$\Sigma^- \to n\pi^-$	−0,068±0,008	10±15	0,98	249^{+12}_{-116}
$\Xi^0 \to \Lambda\pi^0$	−0,413±0,022	21±12	0,85	218^{+12}_{-18}
$\Xi^- \to \Lambda\pi^-$	−0,434+0,015	2±6	0,90	184±12
$\Omega^- \to \Lambda K^-$	−0,10±0,38	—	—	—

36.10. ПАРАМЕТРЫ РАСПАДОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Пусть S и P — амплитуды вероятностей распада на две частицы, находящиеся в s- и p-состояниях по относительному орбитальному моменту. Тогда

$$\alpha = \frac{2|S||P|\cos\Delta}{|S|^2+|P|^2};\quad \beta = \frac{-2|S||P|\sin\Delta}{|S|^2+|P|^2};$$

$$\beta = \sqrt{1-\alpha^2}\sin\varphi;\quad \gamma = \sqrt{1-\alpha^2}\cos\varphi.$$

Значения α, φ, γ, Δ приведены в табл. 36.7

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Перкинс Д.** Введение в физику высоких энергий: Пер. с англ. М.: Мир, 1975.
2. **Клоуз Ф.** Кварки и партоны. Введение в теорию: Пер. с англ. М.: Мир, 1982.
3. **Окунь Л. Б.** Лептоны и кварки. М.: Наука, 1981.
4. **Андреев И. В.** Хромодинамика и жесткие процессы при высоких энергиях. М.: Наука, 1981.
5. **Reviews** of particle properties/Rev. Mod. Phys. 1984. Vol. 56, № 2. Pt. II. P. S2—S304.

Глава 37
ЯДЕРНЫЕ СВОЙСТВА НУКЛИДОВ

В. М. Кулаков

37.1. ТАБЛИЦА НУКЛИДОВ

В соответствии с общепринятой терминологией атомы с данным числом протонов и нейтронов в ядре принято называть *нуклидами*. Нуклиды с одинаковым числом протонов (т. е. принадлежащие одному химическому элементу) называют *изотопами*.

В табл. 37.1 приведены все достоверно известные радиоактивные и стабильные нуклиды в порядке возрастания массового числа для каждого элемента. Данные расположены в шести колонках. В первой колонке приведен общепринятый символ элемента и его зарядовое число Z. Во второй колонке указано массовое число A [символ m, следующий за массовым числом, означает, что приведено метастабильное состояние нуклида; метастабильные состояния приведены лишь тогда, когда их периоды полураспада достаточно велики ($\geqslant$1 с), чтобы идентифицировать их независимо от основных состояний; символы m_1 и m_2 означают различные метастабильные состояния одного нуклида]. В третьей колонке дан полный период полураспада нуклида на основании данных международного файла ENSDF — Evaluted Nucler Structure and Data File (в скобках указано стандартное отклонение $\Delta T_{1/2}$ в единицах младших разрядов приведенного числа).

В четвертой колонке приведен основной тип распада нуклида. Использованы следующие обозначения: α—α-распад; β^- — электронный распад; β^+ — позитронный распад; э.з.—захват орбитального электрона; βn, βp, э.з.n, э.з.p — испускание нейтронов и протонов из возбужденных состояний, возникающих в результате β-распада или захвата орбитального электрона; и п. — изомерный переход (распад из возбужденного метастабильного состояния с переходом на более низкий уровень); с.д. — спонтанное давление. Если у ядра существует несколько типов распада, то все они указаны в этой колонке. В ряде случаев за символом типа распада в круглых скобках приведена относительная доля (в процентах) способа распада, например, э.з. (60). Отсутствие скобок при наличии нескольких типов распада означает, что относительная доля распада не определена. Для стабильных нуклидов приведены (в процентах) значения относительной распространенности нуклида в земной коре. Данные взяты из [5] и соответствуют оцененным значениям, полученным в основном методом масс-спектрометрии, для основных земных образцов. Эти данные выделены полужирным шрифтом. Для радиоактивных нуклидов с очень большими периодами полураспада (поэтому сохранившихся в земной коре) указаны как процентное содержание, так и тип распада, например $^{87}\mathrm{Rb}\ \frac{27{,}835(13)}{\beta^-}$. Цифры в круглых скобках, приведенные за значениями распространенности стабильных нуклидов, указывают стандартное отклонение в единицах младших разрядов. Эти погрешности перекрывают интервал как возможных естественных вариаций изотопного состава, так и экспериментальных погрешностей.

В пятой колонке указаны значения энергий (в мегаэлектрон-вольтах) групп наиболее интенсивных частиц (α, β^-, β^+, n, p), испускаемых при распаде нуклида. В круглых скобках приведена относительная интенсивность групп частиц (в процентах) на полное число распадов. В косых скобках приведена относительная интенсивность групп частиц (в процентах) только для конкретного типа распада. Для сплошных β^-- и β^+-спектров представлены, как правило, значения граничной энергии β-группы с наибольшей энергией. Если β-группа с наибольшей энергией имеет относительно слабую интенсивность, то приводятся значения граничной энергии и интенсивности одной или нескольких β-групп с меньшими граничными энергиями.

Таблица 37.1. **Таблица нуклидов [1, 2]**

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_1$H	1	Стабилен	**99,985 (1)**	—	—
	2		**0,015 (1)**	—	—
	3	12,33 (6) года	β^-	0,0186	—
$_2$He	3	Стабилен	**1,38 (3)·10^{-4}**	—	—
	4		**99,999862 (3)**	—	—
	6	0,8081 (20) с	β^-	3,508	—
	8	0,122 (2) с	β^-, $\beta^- n$ (12)	—	0,98 (88)
$_3$Li	6	Стабилен	**7,5 (2)**	—	—
	7		**92,5 (2)**	—	—
	8	0,842 (6) с	β^-	13	—
			2α	1,6	—
	9	0,176 (2) с	β^-	13,61	—
			n	0,76	
	11	0,0085 с	β^-, $\beta^- n$ (61)	—	—
$_4$Be	7	53,44 (9) сут	э. з.	—	0,477 (10,3)
	9	Стабилен	**100**	—	—
	10	1,6 (2) 10^6 лет	β^-	0,555	—
	11	13,81 (8) с	β^-	11,5	2,14 (32); 4,67 (2,1); 5,85 (2,4); 6,79 (4,4); 7,99 (1,7)
			$\beta^-\alpha$	0,77	
	12	0,0114 (5) с	β^-	11,7	—
$_5$B	8	0,769 (4) с	β^+	14,1	—
			2α	8,3; 1,6	—
	10	Стабилен	**19,9 (2)**	—	—
	11		**80,1 (2)**	—	—
	12	0,02041 (6) с	β^- (~ 100)	13,37	4,43 (1,3)
			$\beta^- 3\alpha$ (1,5)	0,192 (1,5)	
	13	0,01736 (16) с	β^-, $\beta^- n$ (0,28)	13,44	3,68 (7)
	14	0,0161 (12) с	β^-	14,0	6,09; 6,73
$_6$C	9	0,1265 (9) с	p	8,2 (60); 1,1 (40)	—
	10	19,42 (6) с	β^+	1,87	0,511 (200, ан); 0,717 (100); 1,023 (1,7)
	11	20,40 (4) мин	β^+ (> 99)	0,97	0,511 (200, ан.)
			э. з. (0,19)	—	
	12	Стабилен	**98,90 (3)**	—	—
	13		**1,10 (3)**	—	—
	14	5730 (40) лет	β^-	0,156	—
	15	2,449 (4) с	β^-	9,82 (32); 4,51 (68)	5,299 (68)
	16	0,747 (8) с	$\beta^- n$ (> 98,8)	0,79; 1,72	—
$_7$N	12	0,01097 (4) с	β^+ (~ 100)	16,4	0,511 (200, ан.); 4,43 (2,4)
			3α (~ 3)	0,195	—
	13	9,961 (4) мин	β^+	1,20	0,511 (200, ан.)
	14	Стабилен	**99,634 (9)**	—	—
	15		**0,366 (9)**	—	—
	16	7,13 (2) с	β^-	10,40 (26); 4,27 (74)	2,75 (1); 6,13 (69); 7,11 (5)
			α (0,0006)	1,7	—
	17	4,169 (8) с	β^-	8,68(1,6); 7,81(2,6)	0,87(3); 2,19 (0,5)
			n	4,1(95)	
	18	0,63 (3) с	β^-	0,40(45); 1,21(45); 1,81(5) 9,4	0,82 (59); 1,65 (59); 1,98 (100); 2,47 (41)
$_8$O	13	0,0089 (2) с	p	6,40/100/; 6,97/24/	—
	14	70,599 (22) с	β^+	4,12 (0,6); 1,811 (99)	0,511 (200, ан.); 2,312 (99)
	15	122,24 (16) с	β^+	1,74	—
	16	Стабилен	**99,762 (15)**	—	—
	17		**0,038 (3)**	—	—
	18		**0,200 (12)**	—	—
	19	26,91 (8) с	β^-	4,60; 3,3	0,197 (97); 1,37 (59)
	20	13,57 (10) с	β^-	2,8	1,06 (100)
	21 [2]	3,4 с	β^-	6,4	1,73; 1,79; 2,80; 3,52

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{9}F$	17	64,50 (25) с	β^+	1,74	0,511 (200, ан.)
	18	109,77 (5) мин	β^+ (97) э. з (3)	0,635	0,511 (194, ан.)
	19	Стабилен	**100**	—	—
	20	11,03 (6) с	β^-	—	—
	21	4,32 (3) с	β^-	5,41	1,63 (100)
	22	4,23 (4) с	β^-	5,7; 5,3	0,350/100/; 1,38/13/
	23	2,23 (14) с	β^-	11	1,28 (100); 2,08 (67); 2,17
$_{10}Ne$	17	0,109 (10) с	p	—	—
	18	1,67 (2) с	β^+	3,77; 4,59; 5,12	—
	19	17,40 (4) с	β^+	3,42	0,511 (200, ан.); 1,04 (7)
	20	Стабилен	**90,51 (9)**	2,22	0,511 (200, ан.)
	21		**0,27 (2)**	—	—
	22		**9,22 (9)**	—	—
	23	37,24 (12) с	β^-	—	—
	24	3,38 (2) мин	β^-	4,38	0,439 (33); 1,64 (0,9)
	25	0,602 (8) с	β^-	1,99	0,472 (100); 0,88 (8)
$_{11}Na$	20	0,446 (3) с	β^+	7,3	0,090; 0,980
			$\beta^+\alpha$ (20)	11,4	1,63
	21	22,48 (3) с	β^+	2,14/100/; 2,49/5/; 4,44/21/	—
	22	2,602 (2) года	β^+ (90,6) э. з. (9,4)	2,52	0,350 (2,3); 0,511 (200, ан.)
	23	Стабилен	**100**	1,820 (0,05); 0,545	0,511 (180, ан.); 1,275 (100)
	24	15,020 (7) ч	β^-	—	—
	24m	0,02018 (10)	и. п. β^-	—	1,369 (100); 2,754 (100)
	25	59.6 (7) с	β^-	4,17 (0,003); 1,389(100)	0,4723
	26	1,072 (9) с	β^-	—	—
	27	0,304 (7) с	β^-, β^-n (0,08)	6 3,83	0,39 (14); 0,58 (14); 0,98 (15);
	28	0,0305 (4) с	β^-, β^-n (0,6)	6,7	1,61 (6)
$_{12}Mg$	21	0,122 (3) с	э. з. p	8,0	1,82 (100)
	22	3,857 (9) с	β^+	13,9	0,985; 1,698
	23	11,317 (11) с	β^+	1,77; 1,94	1,47; 2,39
	24	Стабилен	**78,99 (3)**	3,2	—
	25		**10,00 (1)**	3,03	0,58; 0,74
	26		**11,01 (2)**	—	0,44 (9); 0,511 (200, ан.)
	27	9,462 (11) мин	β^-	—	—
	28	21,07 (10) ч	β^-	—	—
	29	1,38 (13) с	β^-	1,75 0,9; 0,46	0,18 (0,7); 0,84 (70); 1,013 (30) 0,031 (96); 0,40 (30); 0,95 (30);
$_{13}Al$	23	0,47 (3) с	β^+, β^+p	—	1,35 (70)
	24	2,066 (10) с	β^+ (100) α ($\sim 10^{-2}$)	—	—
	24 m	0,130 (4) с	β^+ и. п.	8,5 2	0,511 (200, ан.)
	25	7,183 (12) с	β^+	—	—
	26	7,2 (3) 10^5 лет	β^+ (85) э. з. (15)	—	—
	26 m	6,345 (3) с	β^+	3,24 1,17	0,439 0,511 (200, ан.)
	27	Стабилен	**100**	—	0,511 (170, ан.); 1,12 (4); 1,81 (100)
	28	2,259 (9) мин	β^-	3,21	0,511 (200, ан.)
	29	6,56 (6) мин	β^-	—	—
	30	3,60 (6) с	β^-	2,85	1,78 (100)
	31	0,644 (25) с	β^-	2,40	1,28 (94); 2,43 (6)
$_{14}Si$	25	0,220 (3) с	β^+, β^+p	6,3; 5,0	2,23 (61); 3,51 (39)
	26	2,210 (21) с	β^+	7,9; 5,6	1,70; 2,32
	27	4,17 (1) с	β^+	—	—
				3,83 3,85	0,511 (200,ан.); 0,82 (34); 1,62 0,511 (200, ан.)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	28		**92,23 (1)**	—	—
	29	Стабилен	**4,67 (1)**	—	—
	30		**3,10 (1)**	—	—
	31	157,3 (3) мин	β^-	1,48	1,26 (0,07)
	32	330(40) лет	β^-	0,21	—
$_{15}$P	28	0,2703 (5) с	β^+	11,0	0,511 (200, ан.), 1,78 (75);
			$\beta^+\alpha$	1,43; 2,10	4,44 (10); 7,6 (5)
	29	4,142 (15) с	β^+	3,95	0,511 (200, ан.); 1,28 (0,8); 2,43 (0,2)
	30	2,498 (4) мин	β^+	3,24	0,511 (200, ан.); 2,23 (0,5)
	31	Стабилен	**100**	—	—
	32	14,36 (4) сут	β^-	1,710	—
	33	25,34 (12) сут	β^-	0,248	—
	34	12,40 (12) с	β^-	5,4	2,13 (25); 4,0 (0,2)
	35	47,3 (7) с	β^-	2,3	1,57
$_{16}$S	29	0,187 (4) с	β^+, β^+p	—	—
	30	1,24 (4) с	β^+	5,09 (20); 4,42 (80)	0,511 (200, ан.); 0,687 (80)
	31	2,584 (18) с	β^+	4,42	0,511 (200, ан.); 1,27 (1,1)
	32		**95,02 (9)**	—	—
	33	Стабилен	**0,75 (1)**	—	—
	34		**4,21 (8)**	—	—
	35	87,24 (17) сут	β^-	0,167	—
	36	Стабилен	**0,02 (1)**	—	—
	37	5,06 (1) мин	β^-	4,7 (10); 1,6 (90)	3,09 (90)
	38	170,3 (7) мин	β^-	3,0 (5); 1,1	1,88 (95)
$_{17}$Cl	32	0,298 (2) с	β^+	11,7; 9,9;	0,511 (200, ан.); 2,24 (70); 4,29 (7); 4,77 (14)
			$\beta^+\alpha$ (0,01)	2,20	—
	33	2,50 (2) с	β^+	4,55	0,511 (200, ан.); 2,9 (0,3)
	34	1,529 (4) с	β^+	4,46	0,511 (200, ан.)
	35	Стабилен	**75,77 (5)**	—	—
	36	$3{,}01\ (2)\cdot 10^5$ лет	β^- (98,1)	0,714	
			э. з. (1,9)	—	0,511 (0,003, ан.)
			β^+ (0,0012)	—	
	37	Стабилен	**24,23 (5)**	—	—
	38	37,24 (5) мин	β^-	4,91	1,60 (38); 2,17 (47)
	38*m*	0,716 (3) с	и. п.	—	0,671 (100)
	39	55,6 (2) мин	β^-	3,45 (7); 2,18 (8); 1,91	0,246 (44); 1,27 (50); 1,52 (42)
	40	1,35 (2) мин	β^-	7,5	1,46/100/; 2,83/100/; 3,10; 5,8
$_{18}$Ar	33	0,18 с	β^+, β^+p (34)	—	0,81
	34	0,841 (10) с	β^+	5,0	0,67; 3,13
	35	1,781 (9) с	β^+	4,94	0,511 (200, ан.) 1,22 (5); 1,76 (22)
	36	Стабилен	**0,337 (3)**	—	—
	37	34,8 (2) сут	э. з.	—	—
	38	Стабилен	**0,063 (1)**	—	—
	39	269 (3) лет	β^-	0,565	—
	40	Стабилен	**99,600 (3)**	—	—
	41	109,6 (4) мин	β^-	2,49 (0,8); 1,198	1,293 (99)
	42	32,9 (11) года	β^-	~0,6	—
	43	5,37 (6) мин	β^-	—	0,74; 0,98; 1,44
	44	11,87 (5) мин	—	—	0,18; 1,70; 1,89
	45	21,48 (15) с	β^-	5,8; 3,2	1,02; 3,71
	46	8 (1) с	β^-	—	1,94
$_{19}$K	36	0,340 (3) с	β^+	9,9	1,97; 2,21 2,43
	37	1,23 (2) с	β^+	5,14	0,511 (200, ан.): 2,79 (2)
	38	7,636 (18) мин	β^+	2,68	0,511 (200, ан.); 2,17 (100)
	38*m*	0,929 (3) с	β^+	5,0	0,511 (200, ан.)
	39	Стабилен	**93,2581 (30)**	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	40	1,277 (8)·10⁶ лет	0,0117 (1)	—	—
			β^- (89)	1,314	—
			э. з. (11)	—	—
			β^+ (0,001)	0,483	—
	41	Стабилен	6,7302 (30)	—	—
	42	12,360 (3) ч	β^-	3,52	0,31 (0,2); 1,524 (18)
	43	22,3 (1) ч	β^-	1,82 (1); 1,2 (3); 0,83	0,373 (85); 0,39*(18); 0,59 (13); 0,619 (81)
	44	22,13 (19) мин	β^-	5.2	1,156 (61); 1,74 (8); 2,1**(37); 2,6 (7)
	45	17,3 (6) мин	β^-	4,2; 2,3	0,17; 1,71
	46	107 (10) с	β^-	6,4	1,35; 3,70
	47	17,5 (3) с	β^-	6,1 (1); 4,1	2,0 (84); 2,6 (15)
	48	6,9 (2) с	β^-	—	—
$_{20}$Ca	37	0,175 (3) с	β^+p	3,10	—
	38	0,447 (10) с	β^+	5,6	1,57
	39	0,876 с	β^+	5,49	0,511 (ан.)
	40	Стабилен	96,941 (13)	—	—
	41	1,4 (2)·10⁵ лет	э. з.	—	—
	42	Стабилен	0,647 (3)	—	—
	43		0,135 (3)	—	—
	44		2,086 (5)	—	—
	45	163,8 (18) сут	β^-	0,252	—
	46	Стабилен	0,004 (3)	—	—
	47	4,536 (2) сут	β^-	1,98 (18); 0,67	0,49 (5); 0,815 (5); 1,308 (74)
	48	$> 2\cdot10^{18}$ лет	0,187 (3)	—	—
	49	8,716 (11) мин	β^-	1,95	3,10 (89); 4,1 (10)
	50	13,9 (6) с	β^-	3,1	0,072; 0,257; 1,52; 1,59
$_{21}$Sc	40	0,1823 (7) с	β^+, β^+p	9,1	0,511 (200, ан.); 3,75
	41	0,601 (12) с	β^+	5,47	—
	42	0,6839 (9) с	э. з.	—	0,511 (200, ан.)
	42*m*	61,3 (7) с	β^+	2,82	0,438 (100); 0,511 (200, ан.); 1,22 (100); 1,52 (100);
	43	3,891 (12) ч	β^+	1,20	0,375 (22); 0,511 (180, ан.)
	43*m*	0,632 (8) с	и. п.	—	—
	44	3,927 (8) ч	β^+	1,47	0,511 (188, ан.); 1,159 (100)
			э. з. (5)	—	
	44*m*	58,6 (1) ч	β^+ (1,39)	—	0,271 (86); 1,02 (1,3)
			и. п. (98,61)	—	
	45	Стабилен	100	—	—
	45*m*	0,316 (9) с	и. п.	—	0,0124
	46	83,83 (2) сут	β^-	1.48 (0,004); 0,357	0,889 (100); 1,120 (100)
	46*m*	18,70 (5) с	и. п.	—	0,142
	47	3,35 (2) сут	β^-	0,600	0,160 (73)
	48	43,7 (1) ч	β^-	0,65	0,175 (6); 0,983 (100); 1,040 (100); 1,314 (100)
	49	57,4 (1) мин	β^-	2,01	1,76 (0,03)
	50	1,708 (9) мин	β^-	4,2; 3,6	0,520 (100); 1,12 (100); 1,55 (100)
	50*m*	0,35 (1) с	н. п.	—	0,257
	51	12,4 (1) с	β^-	5.0; 4,3	1,44; 1,57; 2,14
$_{22}$Ti	41	0,088 (1) с	β^+p	2,3/8/; 3,05/17/; 3,68/16/; 4,12/4/; 4,64/50/; 5,30/5/	—
	42	0,199 (6) с	β^+	6,0; 5,4	0,611
	43	0,490 (20) с	β^+	5,8	—
	44	47,3 (12) года	э. з.	—	0,068 (90); 0,078 (98)
	45	184,8 (5) мин	β^+	1,04	0,718 (0,4); 1,408 (0,3)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	46	Стабилен	**8,0 (1)**	—	—
	47		**7,3 (1)**	—	—
	48		**73,8 (1)**	—	—
	49		**5,5 (1)**	—	—
	50		**5,4 (1)**	—	—
	51	5,76 (1) мин	β^-	2,14	0,320 (95); 0,605 (1,5); 0,928 (5)
	52	1,7 (1) мин	β^-	—	—
	53	32,7 (9) с	β^-	4,8; 3,1	0,101; 0,128; 0,228; 1,676
$_{23}$V	45	0,539 (18) с	β^+	—	—
	46	0,4223 (2) с	β^+	6,03	0,511 (200, ан.)
	46*m*	0,001 (1) с	и. п.	—	0,801
	47	32,6 (3) мин	β^+	1,89	1,80 (0,5)
	48	15,97 (4) сут	β^+ (49)	0,696	0,511 (100, ан.); 0,945 (10);
			э. з. (51)	—	0,983 (100); 1,312 (97)
	49	330 (15) сут	э. з.	—	—
	50	$> 4 \cdot 10^{16}$ лет	**0,250 (2)**	—	
			э. з. (70)	—	0,783 (30); 1,55 (70)
			β^- (30)	—	
	51	Стабилен	**99,750 (2)**	—	—
	52	3,75 (1) мин	β^-	2,47	1,434 (100)
	53	1,61 (4) мин	β^-	2,50	1,006; 1,289
	54	49,8 (5) с	β^-	3,3	0,84 (100); 0,99 (100); 2,21 (100)
$_{24}$Cr	45	0,050 (5) с	β^+p	—	—
	46	0,26 (6) с	β^+	—	—
	47	0,460 (15) с	β^+	—	—
	48	22,96 (3) ч	э. з.	—	0,116 (98); 0,31 (99)
	49	42,09 (15) мин	β^+	1,54	0,063 (14); 0,091 (28) 0,153 (13)
	50	Стабилен	**4,345 (9)**	—	—
	51	27,704 (4) сут	э. з.	—	0,320 (10)
	52	Стабилен	**83,789 (12)**	—	—
	53		**9,501 (11)**	—	—
	54		**2,365 (5)**	—	—
	55	3,55 (3) мин	β^-	2,59	—
	56	5,94 (10) мин	β^-	1,5	0,026; 0,083
$_{25}$Mn	50	0,2832 (6) с	β^+	6,61	—
	50*m*	1,75 (3) мин	β^+	—	0,227
	51	46,2 (1) мин	β^+	2,17	—
	52	5,591 (3) сут	э. з. (66)	—	0,511 (67, ан.); 0,744 (82);
			β^+ (34)	0,575	0,935 (84); 1,434 (100)
	52*m*	21,1 (2) мин	β^+ (98)	1,63	0,511 (193, ан.); 1,434 (100)
			и. п. (2)	—	0,378
	53	$3,7\ (4) \cdot 10^6$ лет	э. з.	—	—
	54	312,5 (5) сут	э. з.	—	0,835 (100)
	55	Стабилен	**100**	—	—
	56	2,5785 (6) ч	β^-	2,85	0,847 (99); 1,811 (29); 2,110 (15)
	57	1,61 (5) мин	β^-	2,55	0,014; 0,122; 0,692
	58	65,3 (7) с	β^-	—	—
	59	4,6 (1) с	β^-	4,8; 4,4	0,473; 0,571; 0,726
	60	1,79 (10) с	β^-	—	—
$_{26}$Fe	49	0,075 (10) с	β^+p	—	—
	51	0,270 (6) с	β^+	—	—
	52	8,275 (8) ч	β^+ (56)	0,80	0,165 (100); 0,511 (112, ан.)
			э. з. (44)	—	—
	52*m*	46 (2) с	э. з., и. п.	—	—
	53	8,51 (2) мин	β^+	3,0	0,38 (32); 0,511 (196, ан.)
	53*m*	2,58 (6) мин	и. п.	—	3,041
	54	Стабилен	**5,8 (1)**	—	—
	55	2,7 года	э. з.	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	56		**91,72 (30)**	—	—
	57	Стабилен	**2,2 (1)**	—	—
	58		**0,28 (1)**	—	—
	59	44,496 (7) сут	β^-	1,57 (0,3); 0,475	0,192 (2,8); 1,095 (56); 1,292 (44)
	60	$\sim 3 \cdot 10^5$ лет	β^-	0,1	—
	61	5,98 (6) мин	β^-	2,8	0,13/11/; 0,30/48/; 1,03/98/; 1,20/100/
	62	68 (2) с	β^-	2,5	0,506
	54	0,19323 (14) с	э. з.	—	—
$_{27}$Co	54*m*	1,48 (2) мин	э. з.	—	0,198
	55	17,54 (4) ч	β^+ (81) э. з. (19)	1,50	0,480 (12); 0,511 (160, ан.); 0,930 (80); 1,41 (13)
	56	78,76 (12) сут	э. з. (80) β^+ (20)	— 1,49	0,511 (40, ан.); 0,847 (100); 1,04 (15); 1,24 (66); 1,77 (15); 2,02 (11); 2,60 (17); 3,26 (13)
	57	270,9 (6) сут	э. з.	—	0,014 (10); 0,122 (86); 0,136 (11)
	58	70,78 (10) сут	э. з. (85) β^+ (15)	—	0,511 (30, ан.); 0,810 (99); 0,865 (1,4)
	58*m*	9,15 (10) ч	и. п.	0,474	0,0249
	59	Стабилен	**100**	—	—
	60	5,271 (1) года	β^-	1,48 (0,12); 0,314 (99)	1,173 (100); 1,332 (100)
	60*m*	10,47 (4) мин	и. п. (> 99) β^- (0,25)	—	—
	61	1,650 (5) ч	β^-	1,55	0,059 (2,1); 1,33 (0,25)
	62	1,50 (4) мин	β^-	1,22	0,067 (89)
	62*m*	13,91 (5) мин	β^- и.п.	2,88	—
	63	27,4 (5) с	β^-	—	1,17** (180); 1,47 (20); 1,74(19); 2,03 (7)
	64	0,30 (3) с	β^-	3,6 7,0	0,087; 0,982 0,931; 1,346
$_{28}$Ni	56	6,10 (2) сут	э. з.	—	0,163 (99); 0,276 (31); 0,472 (35); 0,748 (48); 0,812 (85) 1,56 (14)
	57	36,08 (9) ч	э. з. (54) β^+ (46)	—	0,127 (14); 0,511 (92, ан.); 1,37 (86); 1,89 (14)
	58	Стабилен	**68,27 (1)**	0,85	—
	59	$7,5\,(13) \cdot 10^4$ лет	э. з.	—	—
	60		**26,10 (1)**	—	—
	61	Стабилен	**1,13 (1)**	—	—
	62		**3,59 (1)**	—	—
	63	100,1 (20) года	β^+	0,067	—
	64	Стабилен	**0,91 (1)**	—	—
	65	2,520 (2) ч	β^-	2,13	1,115 (16); 1,481 (25)
	66	54,6 (4) ч	β^-	0,20	—
	67	21 (1) с	β^-	4,1	0,90* (51); 1,26 (15)
$_{28}$Gu	58	3,204 (7) с	β^+	7,5	1,45
	59	81,5 (5) с	β^+	3,7	0,511 (197, ан.); 0,879 (9); 1,305 (11)
	60	23,2 (3) мин	β^+ (93) э. з. (7)	3,92 (6); 3,00 (18); 2.00	0,511 (186, ан.); 0,85 (15); 1,332 (80); 1,76 (52)
	61	3,408 (10) ч	β^+ (60) э. з. (40)	1,22	0,067 (4); 0,284 (12); 0,38 (3); 0,511 (120, ан.); 1,19 (5)
	62	9,74(2) мин	β^+	2,91	0,511 (195, ан.); 0,88 (0,3)
	63	Стабилен	**69,17 (2)**	—	—
	64	12,701 (2) ч	э. з. (43) β^- (38) β^+ (19)	0,573 0,656	0,511 (38, ан.); 1,34 (0,5)
	65	Стабилен	**30,83 (2)**	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	66	5,10 (2) мин	β^-	2,63	1,039 (9)
	67	61,92 (9) ч	β^-	0,57	0,092* (23); 0,184 (40)
	68	31 (1) с	β^-	3,5	0,80 (17); 1,078 (95)
	68*m*	3,75 (5) мин	и. п. (86) β^-	— —	— —
	69	3,0 (1) мин	β^-	2,5	0,531; 0,834; 1,007
	70	4,5 (10) с	β^-	—	—
$_{30}$Zn	57	0,040 (10) с	β^+p	1,92; 2,53; 4,57	—
	59	0,1837 (23) с	э. з.	—	0,491; 0,914
	60	2,38 (5) мин	β^+	3,1;,2,5	0,061; 0,273; 0,334; 0,670
	61	89,1 (2) с	β^+	4,4	0,48 (11); 0,511 (198, ан.); 0,98 (3); 1,64 (6)
	62	9,26 (2) ч	э. з. (82) β^+ (18)	— 0,66	0,042 (20); 0,51** (47); 0,59 (22)
	63	38,1 (3) мин	β^+ (93) э. з. (7)	2,34 —	0,511 (186, ан.); 0,669 (8); 0,962 (6)
	64	Стабилен	**48,6 (3)**	—	—
	65	244,1 (2) сут	э. з. (98,3) β^+ (1,7)	—	0,511 (3,4, ан.); 1,115 (49)
	66		**27,9 (2)**	0,327	
	67	Стабилен	**4,1 (1)**	—	—
	68		**18,8 (4)**	—	—
	69	55,6 (16) мин	β^-	0,90	—
	69*m*	13,76 (2) ч	и. п. (> 99), β^- (0,033)	—	0,439 (95)
	70	Стабилен	**0,6 (1)**	—	—
	71	2,45 (10) мин	β^-	2,61	0,39 (1,3); 0,510 (13); 0,92 (3); 1,12 (153)
	71*m*	3,94 (5) ч	β^-	1,46	0,13 (9); 0,385 (94); 0,495 (75); 0,609 (95); 0,76 (5); 0,99 (8)
	72	46,5 (1) ч	β^-	0,30	0,015 (8); 0,145 (90); 0,192 (10);
	73	23,5 (10) с	β^-	4,7	0,216; 0,496; 0,911
	74	95 (1) с	β^-	2,3; 2,1	0,057; 0,14; 0.19
	75	10,2 (3) с	β^-	5,6	—
	76	5,7 (3) с	β^-	3,7	0,08—1,03
	77	1,4 (3) с	β^-	4,8	0,189; 0,473
	78	1,47 (15) с	β^-	5,1	0,182; 0,225; 0,454; 0,636; 0,860
	79	2,63 (9) с	β^-n	—	—
$_{31}$Ga	62	0,1161 (3) с	э. з.	—	—
	63	32,4 (5) с	э. з.	—	—
	64	2,630 (11) мин	β^+	6,05 (33); 2,8	0,511 (196, ан.); 0,80 (15); 0,992 (43); 1,38 (14); 2,18 (11); 3,32 (18)
	65	15,2 (2) мин	β^+ (> 50) э. з. (< 50)	2,24 (12); 2,11 —	0,061 (12); 0,115 (55); 0,152 (10); 0,511 (180, ан.); 0,75 (10)
	66	9,49 (8) ч	β^+ (57) э. з. (43)	4,153 —	0,511 (114, ан.); 1,039 (37); 2,183 (5); 2,748 (25); 4,30 (5)
	67	3,261 (1) сут	э. з.	—	0,388 (7)
	68	68,1 (3) мин	β^+ (88) э. з. (12)	1,90 —	0,511 (176, ан.); 1,078 (3,5)
	69	Стабилен	**60,1 (2)**	—	—
	70	21,15 (5) мин	β^- (99,8)	1,65	0,173 (0,16); 1,040 (0,5)
	71	Стабилен	**39,9 (2)**	—	—
	72	14,10 (2) ч	β^-	3,15	0,630 (27); 0,835 (96); 2,201 (26); 2,50* (20)
	73	4,87 (3) ч	β^-	1,19	0,054 (9); 0,295 (94); 0,74 (6);
	74	8,1 (1) мин	β^-	2,5	0,60* (100); 0,87* (9); 2,35 (45)
	74*m*	9,5 (10) с	и. п.	—	0,0597
	75	2,10 (3) мин	β^-	3,3	0,58 (3)
	76	27,1 (2) с	β^-	6	0,546; 0,563; 1,108

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	77	13,2 (2) с	β^-	5,2	0,459; 0,469
	78	5,09 (5) с	β^-	7,5; 5,1	0,567; 0,619; 1,186
	79	3,00 (9) с	β^-	6,6	0,09—2,51
	80	1,66 (2) с	β^-, $\beta^- n$	—	1,11
$_{32}$Ge	61	0,040 (15) с	—	—	—
	64	63,7 (25) с	β^+	3,3; 3,0	0,128; 0,427; 0,667
	65	30,9 (7) с	β^+	5,2; 4,6	0,511 (197, ан.); 0,67 (3); 1,72 (2)
	66	2,26 (5) ч	β^+ (62) э. з. (38)	1,1; 0,7 —	0,046 (37); 0,114 (22); 0,185 (23); 0,27 (19); 0,34 (19); 0,38 (48); 0,47 (19); 0,511 (124, ан.)
	67	18,7 (5) мин	β^+	3,2; 3,0	0,170* (105); 0,511 (170, ан.); 1,473
	68	287 (6) сут	э. з.	—	—
	69	39,05 (10) ч	э. з. (67) β^+ (33)	— 1,22	0,511 (68, ан.); 0,573 (13); 0,872 (10); 1,107 (28)
	70	Стабилен	**20,5 (5)**	—	—
	71	11,8 (4) сут	э. з.	—	—
	71*m*	0,0202 (5) с	и. п.	—	0,198
	72	Стабилен	**27,4 (6)**	—	—
	73	Стабилен	**7,8 (2)**	—	—
	73*m*	0,499 (11) с	и. п.	—	0,0666
	74	Стабилен	**36,5 (7)**	—	—
	75	82,78 (4) мин	β^-	1,19	0,199 (1,4); 0,265 (11)
	75*m*	47,7 (7) с	и. п. (99,97), β^- (0,03)	—	0,1397
	76	Стабилен	**7,8 (2)**	—	—
	77	11,30 (1) ч	β^-	2,2	0,21* (61); 0,263 (45); 0,368 (15); 0,417 (25); 0,563 (18); 0,73** (14)
	77*m*	52,9 (6) с	β^- (76) и. п. (24)	2,9 —	0,159 (12); 0,215 (21)
	78	88 (1) мин	β^-	0,71	0,277 (94); 0,294
	79	19,1 (3) с	β^-	4,1	0,109
	79*m*	39,0 (10) с	и. п.	—	0,186
	80	29,5 (4) с	β^-	2,4	0,266; 0,937; 1,564
	81	10,1 с	β^-	~5,6; ~5,3	0,336; 0,737; 0,793
	82	4,6 (4) с	β^-	—	1,093
	83	1,9 (4) с	—	—	—
	84	1,2 (3) с	—	—	—
$_{33}$As	66	0,0958 (4) с	э. з.	—	—
	67	42,5 (12) с	β^+	5,0; 4,7	0,121; 0,123; 0,244
	68	2,527 (13) мин	э. з.	—	0,651; 0,762; 1,016; 1,778
	69	15,2 (2) мин	β^+	2,9	0,23; 0,511 (ан.)
	70	52,6 (3) мин	β^+	2,89 (6); 2,14	0,511 (183, ан.); 0,60 (23); 0,67 (25); 0,75 (23); 1,04 (78); 1,12 (23); 1,71 (22)
	71	64.8 (7) ч	э. з. (70) β^+ (30)	— 0,81	0,175 (90); 0,511 (60, ан.)
	72	26,0 (1) ч	β^+, э. з.	3,34 (17); 2,50	0,511 (150, ан.); 0,630 (8); 0,835 (78)
	73	80,30 (6) сут	э. з.	—	0,054 (9)
	74	17,78 (3) сут	β^- (32) β^+ (29) э. з. (39)	1,36 1,54 (3); 0,95 (26) —	0,511 (59, ан.) 0,596 (61); 0,635 (14)
	74*m*	8,0 с	и. п.	—	0,283
	75	Стабилен	**100**	—	—
	76	26,32 (7) ч	β^-	2,97	0,559 (43); 0,657 (6); 1,22* (5)
	77	38,83 (5) ч	β^-	0,68	0,239 (2,5); 0,522 (0,8)
	78	90,7 (2) мин	β^-	4,1	0,614/42/; 0,70/15/; 0,83/8/; 1,31/11/
	79	9,01 (15) мин	β^-	2,15	0,36 (2); 0,43 (2); 0,89 (1)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	80	15,2 (2) с	β^-	6,0	0,66 (42); 1,22 (4); 1,64 (4); 1,77 (1,7)
	81	33 (2) с	β^-	3,8	0,468; 0,491
	82	21 с	β^-	7,1	0,655; 1,080; 1,731
	83	14,1 (11) с	β^-	3,4	0,735; 1,113
	84	5,5 (3) с	β^-, $\beta^- n$ (0,1)	—	0,667; 1,455
	85	2,028 (12) с	β^-, $\beta^- n$ (23)	—	—
	86	0,9 (2) с	β^-, $\beta^- n$ (~ 4)	—	0,704
	87	0,75 (6) с	β^-	—	—
$_{34}$Se	69	27,4 (2) с	э. з.; э. з. p (0,07)	—	0,098; 0,691
	70	41,0 (6) мин	э. з.	—	—
	71	4,74 (5) мин	э. з.	—	0,16; 0,511 (ан.)
	72	8,40 (8) сут	э. з.	—	0,046 (59)
	73	7,15 (8) ч	β^+ (65)	1,30	0,066 (65); 0,359 (99);
			э. з. (35)	—	0,511 (130, ан.)
	73m	39,8 (13) мин	э. з. (27)	—	0,0257
			и. п. (73)	—	
	74	Стабилен	0,9 (1)	—	—
	75	119,77 (1) сут	э. з.	—	0,121 (17); 0,136 (57); 0,265 (60); 0,280 (25); 0,401(12)
	76	Стабилен	9,0 (2)	—	—
	77	Стабилен	7,6 (2)	—	—
	77m	17,45 (10) с	и. п.	—	0,162 (50)
	78	Стабилен	23,6 (6)	—	—
	79	~ $6{,}5 \cdot 10^4$ лет	β^-	0,16	—
	79m	3,91 (5) мин	и. п.	—	0,096 (9)
	80	Стабилен	49,7 (7)	—	—
	81	18,5 мин	β^-	1,58	0,28** (0,9); 0,56** (0,3); 0,83 (0,2)
	81m	57,25 мин	и. п. (>99)	—	0,103 (8)
			β^- (0,058)	—	—
	82	$1{,}4 \cdot 10^{20}$ лет	9,2(5)	—	—
	83	22,5 (2) мин	β^-	1,8	0,22 (44); 0,36 (69); 1,88 (16); 2,29 (9)
	83m	70,4 (3) с	β^-	3,8	0,35/16/; 0,65/20/; 1,01**/100/; 2,02/40/
	84	3,2 (2) мин	β^-	1,4	0,407
	85	31,7 (9) с	β^-	6,2	0,345; 1,427; 3,396
	86	15,3 (9) с	β^-	2,6	2,441; 2,660
	87	5,55 (20) с	β^-, $\beta^- n$ (0,16)	—	0,243; 0,334; 0,468; 0,573
	88	1,53 (6) с	β^-, $\beta^- n$ (0,8)	—	0,159; 0,259; 1,904
	89	0,41 (4) с	β^-, $\beta^- n$ (5)	—	—
	91	0,27 (5) с	β^-, $\beta^- n$ (~21)	—	—
$_{35}$Br	72	78,6 (24) с	э. з.	—	—
	73	3,4 (3) мин	э. з.	—	—
	74	25,3 (3) мин	β^+	4,7	0,511 (ан.); 0,64
	74m	41,5 (15) мин	β^+	—	0,195
	75	97 (2) мин	β^+ (90)	1,70	0,285; 0,511 (ан.); 0,62
			э. з. (~ 10)	—	
	76	16,2 (2) ч	β^+ (~ 62)	3,6	0,511 (133, ан.); 0,559 (63);
			э. з. (~ 38)	—	0,65 (19); 1,21 (13); 1,86 (11)
	77	57,036 (6) ч	э. з (99)	—	0,24**(30); 0,52 (24); 0,58 (7)
			β^+ (1)	0,34	
	77m	4,28 (10) мин	и. п.	—	0,106
	78	6,46 (4) мин	β^- (⩽ 0,01)	2,55	0,511 (184, ан.); 0,614 (14)
			э. з. (> 99)	—	
	79	Стабилен	50,69 (5)	—	—
	79m	4,864 (30) с	и. п.	—	0,207
	80	17,68 (2) мин	β^- (92)	2,00	0,511 (5, ан.); 0,618 (7);
			β^+ (2,6)	0,87	0,666 (1)
			э. з. (5,7)	—	

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	80*m*	4,42 (1) ч	и. п.	—	0,086
	81	Стабилен	**49,31 (5)**	—	—
	82	35,30 (2) ч	β^-	0,444	0,554 (66); 0,619 (41); 0,777 (83); 1,044 (29)
	82*m*	6,13 (8) мин	и. п. (97,6)	—	
			β^- (2,4)	3,1	} 0,046 (0,3); 0,777 (0,15)
	83	2,39 (2) ч	β^-	0,93	0,530 (1,4)
	84	31,80 (8) мин	β^-	4,68	0,88 (51); 1,90 (18); 3,93 (13)
	84*m*	6,0 (2) мин	β^-	2,2	0,424; 0,882; 1,463
	85	172 (2) с	β^-	2,5	0,802; 0,925
	86	55,0 (8) с	β^-	7,1	1,36/39/; 1,56/100/; 2,75/36/
	87	55.69 (13) с	β^-	2,6	1,44/100/; 1,85/18/; 2,48/18/; 2,98/25/; 4,19/21/
	88	16,3 (3) с	β^-, $\beta^- n$ (6)	—	0,76
	89	4,53 (10) с	β^-, $\beta^- n$ (13)	—	0,775; 1,098
	90	1,71 (14) с	β^-, $\beta^- n$ (23)	—	0,707; 1,362
	91	0,541 (5) с	β^-, $\beta^- n$ (9)	—	0,263; 0,803
	92	0,365 (7) с	β^-, $\beta^- n$ (16)	—	0,740
$_{36}$Kr	72	17,2 (3) с	β^+	3,8	0,163; 0,310; 0,415; 0,577
	73	27,0 (12) с	β^+, $\beta^+ p$ (0,7)	—	0,178; 0,241; 0,455
	74	11,50 (11) мин	β^+	2,2; 2,0	0,511 (ан.)
	75	4,3 (1) мин	β^+	3,2	0,133; 0,155
	76	14,8 (1) ч	э. з.	—	0,045; 0,270; 0,316; 0,407
	77	74,4 (6) мин	β^+ (~ 80)	1,86	
			э. з. (~ 20)	—	} 0,130; 0,147
	78	Стабилен	**0,35 (2)**	—	—
	79	35,04 (10) ч	э. з. (92)	—	—
			β^+ (8)	0,60	} 0,398 (10); 0,511 (15, ан); 0,606 (10)
	79*m*	50 (3) с	и. п.	—	0,130
	80	Стабилен	**2,25 (2)**	—	—
	81	2,1 (2)·10^5 лет	э. з.	—	0,276
	81*m*	13 с	и. п.	—	0,190 (65)
	82	} Стабилен	**11,6 (1)**	—	—
	83		**11,5 (1)**	—	—
	83*m*	1,83 (2) ч	и. п.	—	0,009; 0,042
	84	Стабилен	**57,0 (3)**	—	—
	85	10,72 (2) года	β^-	0,67	0,514 (0,4)
	85*m*	4,480 (8) ч	β^- (79)	0,82	
			и. п. (21)	—	} 0,150 (74); 0,305 (13)
	86	Стабилен	**17,3 (2)**	—	—
	87	76,31 (62) мин	β^-	3,8	0,403 (84); 0,85 (16); 2,57 (35)
	88	2,84 (3) ч	β^-	2,8	0,191 (35); 0.85 (23); 1,55 (14); 2,40 (35)
	89	3,07 (9) мин	β^-	4,0	0,23/85/; 0,51/42/; 0,60/100/; 0,88/65/; 1,12/45/; 1,51/88/
	90	32,32 (9) с	β^-	4,4; 2,6	0,120 (65); 0,536 (48); 1,11(48)
	91	8,57 (4) с	β^-	6,4; 3,6	0,109; 0,507; 0,613; 1,109
	92	1,85 (1) с	β^-, $\beta^- n$ (0,032)	—	0,142; 0,548; 0,813; 1,219
	93	1,289 (12) с	β^-, $\beta^- n$ (1,9)	—	0,253; 0,267; 0,324; 2,350
	94	0,20 (1) с	β^-, $\beta^- n$ (6)	—	0,220; 0,359; 0,629
	95	0,78 (3) с	β^-	—	—
	97	< 0,1 с	—	—	—
$_{37}$Rb	75	17,2 (8) с	э. з.	—	0,179
	76	36,8 (15) с	β^+	5,2	0,354; 0,423; 2,573
	77	3,70 (15) мин	э. з.	—	0,067; 0,179; 0,394
	78	17,66 (8) мин	э. з.	—	0,455; 0,693; 3,438
	79	22,9 (5) мин	э. з.	—	0,15 (73); 0,19 (29); 0,511 (180, ан.)
	80	34 (4) с	β^+	4,7	0,511 (195, ан.); 0,618 (39)
	81	4,58 (1) ч	э. з. (87)	—	
			β^+ (13)	1,03	} 0,446

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	81*m*	32 мин	β^+, и. п.	1,4	0,085
	82	1,25 (3) мин	β^+ (96) э. з. (4)	3,15 —	0,511 (192, ан.); 0,777 (9)
	82*m*	6,2 (5) ч	э. з. (94) β^+ (6)	— 0,78	0,554 (66); 0,619 (41); 0,777 (83)
	83	86,2 (1) сут	э. з.	—	0,53** (93); 0,79 (0,9)
	84	32,87 (11) сут	э. з. (76) β^+ (21) β^- (3)	— 1,66 0,91	0,511 (42, ан.); 0,88 (74)
	84*m*	20,49 (17) мин	и. п.	—	0,216 (37); 0,250 (65); 0,464 (32)
	85	Стабилен	**72,165 (13)**	—	—
	86	18,66 (2) сут	β^- (> 99), э. з. (0,005)	1,78	1,078 (8,8)
	86*m*	1,017 (3) мин	и. п.	—	0,556
	87	4,80 (13) × × 10^{10} лет	**27,835 (13)**	—	—
			β^-	0,274	—
	88	17,8 (1) мин	β^-	5,3	0,898 (13); 1,863 (21)
	89	15,2 (1) мин	β^-	3,92 (7); 2,9 (5); 1,6	0,66 (17); 1,05 (75); 1,26 (54)
	90	153 (3) с	β^-	6,6	0,83* (61); 3,34** (15); 4,13 (11); 4,34* (18)
	90*m*	258 (5) с	β^- и. п.	— —	0,107
	91	58,4 (4) с	β^-	5,8	0,094; 0,346; 2,564; 3,6
	92	4,50 (2) с	β^-, $\beta^- n$ (0,012)	—	0,570; 0,815; 2,821
	93	5,8 (1) с	β^-, $\beta^- n$ (1,3)	—	0,213; 0,433 0,986; 1,385
	94	2,69 (4) с	β^-, $\beta^- n$ (10)	—	0,837; 1,09; 1,309; 1,578
	95	0,384 (6) с	β^-, $\beta^- n$ (8,4)	—	0,204; 0,329; 0,352; 0,681
	96	0,199 (3) с	β^-, $\beta^- n$ (13)	—	0,815; 1,037
	97	0,176 (6) с	β^- $\beta^- n$ (27)	—	0,167; 0,585; 0,599
	98	0,114 (5) с	β^-, $\beta^- n$ (13)	—	0,144; 2,172
	99	0,076 (5) с	β^-	—	0,091; 0,145
$_{38}$Sr	78	~ 30,6 мин	—	—	—
	79	2,25 (10) мин	э. з.	—	—
	80	106,3 (15) мин	э. з.	—	0,58
	81	25,5 мин	э. з.	—	0,15; 0,19; 0,44
	82	25,0 (4) сут	э. з.	—	—
	83	32,4 (2) ч	э. з. (84) β^+ (16)	— 1,15	0,040 (24); 0,38 (35); 0,511 (32, ан.); 0,76 (40)
	84	Стабилен	**0,56 (1)**	—	—
	85	64,84 (2) сут	э. з.	—	0,514 (100)
	85*m*	67,66 (7) мин	и. п. (86) э. з. (14)	— —	0,150 (14); 0,239 (85)
	86	Стабилен	**9,86 (1)**	—	—
	87		**7,00 (1)**	—	—
	87*m*	2,81 (1) ч	и. п. (> 99) э. з. (0,3)	— —	0,388 (80)
	88	Стабилен	**82,58 (1)**	—	—
	89	50,55 (9) сут	β^-	1,463	0,91 (0,01)
	90	28,6 (3) лет	β^-	0,546	—
	91	9,52 (6) ч	β^-	2,67	0,645 (15); 0,748 (27); 1,025 (30)
	92	2,71 (1) ч	β^-	1,5 (10); 0,55	0,44 (3); 1,37 (90)
	93	7,6 (2) мин	β^-	2,9	0,60; 0,8; 1,2
	94	78 (2) с	β^-	3,5; 2,1	1,42 (100)
	95	25,1 (2) с	β^-	6,1	0,686; 2,247; 2,717; 2,933
	96	1,06 (4) с	β^-	4,4	0,122; 0,809; 0,932
	97	0,40 с	β^-	7,4; 5,2	0,307; 0,652; 0,954; 1,905
	98	0,65 (3) с	β^-	5,7	0,037; 0,119; 0,429; 0,445
$_{39}$Y	81	5 мин	—	—	—
	82	~ 10 мин	—	—	—
	83	7,06 (8) мин	э. з.	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	84	40 (1) мин	β^+	3,5 2,24	0,795 (100); 0,982 (100); 1,041 (50)
	85	2,68 (5) ч	β^+ (70) э. з. (30)	— 1,54	} 0,231 (13); 0,511 (140, ан.)
	85*m*	4,86 (13) ч	β^+ (55) э. з. (45)	— —	} 0,51** (200); 0,92 (9)
	86	14,74 (2) ч	э. з. (74) β^+ (26)	— 3,15; 2,34	} 0,51* (35); 0,63* (37); 1,077 (82); 1,16*(35); 1,925 (24)
	86*m*	48 (1) мин	и. п. (99,31) β^+ (0,69)	— —	} 0,218 (94)
	87	80,3 (3) ч	э. з. (> 99) β^+ (0,3)	— —	} 0,483
	87*m*	12,9 (4) ч	и. п. (~ 98) э. з. (~ 2)	— —	} 0,381 (74)
	88	106,60 (4) сут	э. з. (> 99) β^+ (0,2)	— 0,76	} 0,898 (93); 1,836 (100); 2,734 (1)
	89	Стабилен	100	—	—
	89*m*	16,06 (4) с	и. п.	—	0,909 (99)
	90	64,1 (1) ч	β^-	2,27	—
	90*m*	3,19 (1) ч	и. п. (> 99) β^- (0,0021)	— —	} 0,202 (97); 0,482 (91)
	91	58,51 (6) сут	β^-	1,545	1,21 (0,3)
	91*m*	49,71 (4) мин	и. п.	—	0,555
	92	3,54 (1) ч	β^-	3,63	0,934 (14); 1,40 (4,7)
	93	10,1 (2) ч	β^-	2,89	2,267 (6); 0,94 (2,3); 1,90 (1,8)
	94	19,1 (4) мин	β^-	5,0	0,56 (6); 0,92 (43); 1,13 (5)
	95	10,3 (2) мин	β^-	4,4	0,954; 1,324; 2,176; 2,633; 3,577
	96	2,3 (1) мин	β^-	—	—
	97	1,11 (14) с	β^-	6,0; 5,1	—
	98	0,64 (3) с	β^-	8,8	1,22; 1,59; 2,94; 4,45
	99	1,5 (1) с	β^-, $\beta^- n$ (1)	—	0,122; 0,724
	102	0,27 (7) с	β^-	—	—
$_{40}$Zr	81	10 мин	—	—	—
	84	5,05 (5) мин	—	—	—
	85	7,86 (4) мин	э. з.	—	—
	85*m*	10,9 (3) с	и. п.	—	0,292
	86	16,5 (1) ч	э. з.	—	0,028 (20); 0,243 (96); 0,612 (5)
	87	104,0 (5) мин	β^+	2,10	0,511 (ан.); 1,2; 2,2
	87*m*	14,0 (2) с	и. п.	—	0,336; 0,201; 0,135
	88	83,4 (3) сут	э. з.	—	0,394 (97)
	89	78,43 (8) ч	э. з. (78) β^+ (22)	— 0,90	} 0,511 (44, ан.); 0,91 (99)
	89*m*	4,18 (1) мин	и. п. (94) э. з. (4,7) β^+ (1,3)	— — 2,40 (0,2); 0,89 (1,2)	} 0,588 (87); 1,51 (6)
	90	} Стабилен	51,45 (2)	—	—
	91		11,22 (2)	—	—
	92		17,15 (1)	—	—
	93	1,53 (10) × × 10^6 лет	β^-	0,060	—
	94	Стабилен	17,38 (2)	—	—
	95	64,02 (4) сут	β^-	0,89 (2); 0,396	0,724 (49); 0,756 (49)
	96	$>3{,}56 \cdot 10^{17}$ лет	2,80 (1)	—	—
	97	17,0 (2) ч	β^-	1,91	0,747 (92); 1,148
	98	30,7 (4) с	β^-	2,3	—
	99	2,1 (1) с	β^-	3,5	0,47; 0,55; 0,59
	102	2,9 (2) с	β^-	—	0,535; 0,600

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излученя
$_{41}$Nb	84	12 (3) с	э. з.	—	—
	86	80 (12) с	э. з.	—	—
	87	2,60 (7) мин	β^+	—	0,201; 0,471
	88	14,3 (3) мин	э. з.	—	0,503; 0,671; 1,06; 1,08
	89	122 (4) мин	β^+	2,9	0,511 (ан.); 1,626; 3,577; 3,838
	90	14,60 (5) ч	β^+, э. з.	1,50	0,142 (75); 1,14 (97); 2,32 (82)
	91	~ $1 \cdot 10^4$ лет	э. з.	—	—
	91*m*	62 сут	и. п. (97)	—	0,104 (0,5); 1,21 (3)
			э. з. (3)	—	
	92	$3,5\ (3) \cdot 10^7$ лет	э. з.	—	0,561; 0,934
	92*m*	10,15 (2) сут	э. з. (> 99)	—	0,934 (99)
			β^+ (0,06)	—	
	93	Стабилен	**100**	—	—
	93*m*	13,6 (3) года	и. п.	—	0,030
	94	2,03 (16) × × 10^4 лет	β^-	0,49	0,702 (100); 0,871 (100)
	94*m*	6,26 (1) мин	и. п. (> 99)	—	0,041; 0,871
			β^- (0,5)	—	
	95	34,97 (3) сут	β^-	0,160	0,765 (105)
	95*m*	86,6 (8) ч	и. п. (97,5)	—	0,235
			β^- (2,5)	1,0	
	96	23,35 (5) ч	β^-	0,7	0,459 (28); 0,569 (59); 0,778 (97); 1,092 (49)
	97	72,1 (7) мин	β^-	1,27	0,665 (98)
	97*m*	60 (1) с	и. п.	—	0,743 (98)
	98	2,86 (6) с	β^-	4,6	0,787; 1,024
	98*m*	51,3 (4) мин	β^-	3,1	0,720 (75); 0,787 (100) 1,16 (30)
	99	14,3 с	β^-	—	0,098; 0,138
	99*m*	2,6 (2) мин	β^-	3,2	0,100 /1/; 0,260 /1/
	101	7,1 (3) с	β^-	4,3	0,158; 0,276; 0,441; 0,480
	103	1,5 (2) с	β^-	5,4	0,103: 0,641
	105	1,8 (8) с	β^-	—	—
$_{42}$Mo	88	8,2 (5) мин	β^+	2,5	0,511 (ан.); 2,69
	90	5,67 (5) ч	β^+ (25)	1,2	0,122 (71); 0,257 (85);
			э. з. (75)	—	0,511 (50, ан.)
	91	15,49 (1) мин	β^+	3,44	0,511 (ан.)
	91*m*	65,2 (8) с	и. п. (~ 57)	—	0,658 (54); 1,21 (22); 1,53 (15)
			β^+ (~ 43)	3,99/15/; 2,78 /100/	
	92	Стабилен	**14,84 (4)**	—	—
	93	$3,5\ (7) \cdot 10^3$ лет	э. з.	—	—
	93*m*	6,85 (7) ч	и. п. (99,88);	—	0,264 (58); 0,685 (100);
			э. з. (0,12)		1,479 (100)
	94	Стабилен	**9,25 (2)**	—	—
	95		**15,92 (4)**	—	—
	96		**16,68 (4)**	—	—
	97		**9,55 (2)**	—	—
	98		**24,13 (6)**	—	—
	99	66,02 (1) ч	β^-	1,23	0,181 (7); 0,740 (12); 0,780 (4)
	100	Стабилен	**9,63 (2)**	—	—
	101	14,6 (1) мин	β^-	2,23	0,191 (25); 0,59 (21); 1,02 (25)
	102	11,3 (2) мин	β^-	1,2	0,148; 0,212; 0,224
	103	67,5 (15) с	β^-	—	0,424
	104	1,3 (3) мин	β^-	4,8	0,070
	105	36,7 (10) с	β^-	—	0,077; 0,085; 0,148
	106	8,4 (5) с	β^-	—	0,054; 0,466; 0,619
	108	1,5 (4) с	β^-	—	0,26
$_{43}$Tc	91	3,14 (2) мин	β^+	5,2	—
	92	4,4 (3) мин	β^+ (~ 92)	4,1	0,14 (67); 0,33 (90);
			э. з. (~ 8)	—	0,511 (184, ан.); 0,79 (95); 1,54 (100)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	93	2,75 (5) ч	э. з. (87) β^+ (13)	— 0,80	0,511 (26, ан.); 1,35 (65); 1,49 (33)
	93*m*	43,5 (10) мин	и. п. (80) э. з. (20)	— —	0,390 (63); 2,66 (18) —
	94	293 (1) мин	β^+ (11) э. з. (89)	0,816 —	0,511 (22, ан.); 0,702 (100); 0,849 (100); 0,871 (100)
	94*m*	52 (1) мин	β^+ (66) э. з. (34)	2,47 —	0,511 (132, ан.); 0,871 (91); 1,53 (10); 1,87 (9)
	95 95*m*	20,0 (1) ч 61 (2) сут	β^+ э. з. (95) β^+ (0,42) и. п. (4)	— — 0,68 —	0,768 (82); 0,84 (11) 0,204 (70); 0,584 (36); 0,838 (27)
	96	4,28 (7) сут	э. з.	—	0,778 (100); 0,81 (84); 0,851 (100); 1,12 (16)
	96*m*	51,5 (10) мин	э. з. (2) и. п. (98)	— —	0,034; 0,778; 1,200
	97 97*m* 98 99 99*m*	$2,6\,(4)\cdot10^6$ лет 91 сут $4,2\,(3)\cdot10^6$ лет $2,13\,(5)\cdot10^5$ лет 6,02 (3) ч	э. з. и. п. β^- β^- и. п. (>99), β^- ($\sim 1\cdot10^{-4}$)	— — 4,0 0,292 —	— — 0,66 (100); 0,76 (100) — 0,1426 (90)
	100 101 102 102*m*	15,8 (1) с 14,2 (1) мин 5,28 (15) с 4,35 (7) мин	β^- β^- β^- β^- (~ 98) и. п. (~ 2)	3,38 1,32 4,2 2,0 —	0,540; 0,60 0,307 (91); 0,545 (8) 0,475 0,47; 0,63
	103 104 105 106 107 108 109 110	54,2 (8) с 18,2 (5) мин 7,7 (2) мин 36 (1) с 21,2 (2) с 5,17 (7) с 1,4 (4) с 0,83 (4) с	β^- β^- β^- β^- β^- β^- — β^-	2,2 4,6 3,4 — — — — —	0,135/17/; 0,21/10/ 0,36; 0,53; 0,88; 0,89 0,108; 0,143; 0,159; 0,321 0,270; 1,97; 2,24; 2,79 0,10; 0,18 0,24; 0,47; 0,71; 0,73; 1,58 — 0,241
$_{44}$Ru	92 94 95	3,65 (5) мин 51,8 (6) мин 1,64 (1) ч	β^+ э. з. э. з. (85) β^+ (15)	— — — 1,33	0,135; 0,214; 0,259 0,367; 0,891 0,340 (70); 0,511 (30, ан.); 0,625 (13); 1,09 (21)
	96 97 98 99 100 101 102	Стабилен 2,9 (1) сут Стабилен	5,52 (5) э. з. 1,88 (5) 12,7 (1) 12,6 (1) 17,0 (1) 31,6 (2)	— — — — — — —	— 0,215 (91); 0,324 (8) — — — — —
	103 104 105	39,35 (5) сут Стабилен 4,44 (2) ч	β^- 18,7 (2) β^-	0,70 (3); 0,21 — 1,87 (11); 1,15	0,497 (88); 0,610 (6) — 0,317*(11); 0,475*(20); 0,67*(16); 0,726 (48)
	106 107 108 109 110 111 112	371,63 (17) сут 3,75 (5) мин 4,55 (5) мин 35 (3) с 14,6 (10) с 2,2 (7) с 4,65 (14) с	β^- β^- β^- β^- β^- β^-	0,039 3,2 1,3 — — — —	— 0,195 (14); 0,86 (7) 0,165 (28) 0,206; 0,226; 1,93 0,096; 0,112 — —
$_{45}$Rh	95 95*m* 96 96*m*	5,02 (10) мин 1,96 (4) мин 9,90 (10) мин 1,51 (2) мин	э. з. э. з. (12), и. п. (88) β^+ β^+ (40), и. п. (60)	— — 3,3 —	— 0,543; 0,784 0,63; 0,68; 0,83 0,052; 1,10; 1,70

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	97	32 мин	β^+	2,1	0,422; 0,840; 0,879
	98	8,7 (2) мин	β^+	3,5; 2,8	0,65 (100)
	98*m*	3,5 (3) мин	β^+	—	0,050; 0,745
	99	16 сут	э. з. (90) β^+ (10)	— 0,74	0,511 (20, ан.); 0,62 (20)
	99*m*	4,7 ч	э. з.	—	0,065; 0,341; 0,618; 1,261
	100	20,8 (1) ч	э. з. (93) β^+ (7)	— 2,62	0,511 (13, ан.); 0,540 (88); 0,820 (25); 2,37 (39)
	101	3,3 (3) года	э. з.	—	0,127 (88); 0,198 (75); 0,325 (11)
	101*m*	4,34 (1) сут	э. з. (92,8) и. п. (7,2)	— —	0,157; 0,307 (83); 0,545 (6)
	102	~ 2,9 года	э. з.	—	0,475; 0,631; 0,697
	102*m*	207 (3) сут	э. з., и. п. (5) β^+ β^- (19)	— 1,29 1,25	0,475 (57); 0,511 (25, ан.); 0,628
	103	Стабилен	**100**	—	—
	103*m*	56,12 (1) мин	и. п.	—	0,040 (0,4)
	104	42,3 (4) с	β^-	2,44	0,56 (2); 1,24 (0,13)
	104*m*	4,34 (5) мин	и. п. (> 99) β^- (0,13)	— —	0,051 (47); 0,078 (2,5); 0,097 (2,6); 0,129
	105	35,36 (6) ч	β^-	0,568	0,306 (5); 0,319 (19)
	105*m*	45 с	и. п.	—	0,129
	106	29,80 (8) с	β^-	3,54	0,512 (21); 0,622*(11)
	106*m*	130 (2) мин	β^-	1,7; 0,9	0,140; 0,512; 0,717; 1,046
	107	21,7 (4) мин	β^-	1,20	0,305 (73); 0,390 (11)
	108	16,8 (5) с	β^-	4,5	0,434 (43); 0,51**(10); 0,62 (22)
	109	80 (2) с	β^-	2,6; 2,3	0,11; 0,18; 0,29; 0,33; 0,43
	110	3,2 (2) с	β^-	5,5	0,374; 0,440; 0,797
	112	0,8 (1) с	β^-	—	0,349
	113	~ 0,91 с	β^-	—	0,129
	114	1,68 (7) с	β^-	—	0,333
$_{46}$Pd	98	17,7 (3) мин	β^+	2,3	0,112; 0,663; 0,838
	99	21,4 (2) мин	β^+	2,2	0,136; 0,264; 0,673
	100	3,63 (9) сут	э. з.	—	0,074 (34); 0,084 (49); 0,126 (16)
	101	8,47 (6) ч	э. з. β^+ (2,5)	— 0,78	0,296 (30); 0,590 (24)
	102	Стабилен	**1,020 (12)**	—	—
	103	16,96 (2) сут	э. з.	—	0,297 (0,011); 0,362 (0,06); 0,498 (0,011)
	104	Стабилен	**11,14 (8)**	—	—
	105		**22,33 (8)**	—	—
	106		**27,33 (5)**	—	—
	107	6,5 (3) × × 10^6 лет	β^-	0,03	—
	107*m*	21,3 (5) с	и. п.	—	0,215
	108	Стабилен	**26,46 (9)**	—	—
	109	13,46 (2) ч	β^-	1,028	0,088 (5); 0,60 (0,03)
	109*m*	4,69 (1) мин	и. п.	—	0,189
	110	Стабилен	**11,72 (9)**	—	—
	111	23,4 (2) мин	β^-	2,2	0,38/5/; 0,60*/13/; 1,4*/8/
	111*m*	5,5 (1) ч	и. п. (71) β^- (29)	— 2,0	0,172
	112	21,045 (40) ч	β^-	0,28	0,019 (20)
	113	93 (5) с	β^-	—	0,096; 0,222; 0,643; 0,739
	114	2,4 (1) мин	β^-	—	0,126; 0,136; 0,232; 0,358
	115	41 (3) с	β^-	—	0,089; 0,255; 0,343
	116	12,72 (44) с	β^-	—	0,115; 0,178
	117	5,0 (6) с	β^-	—	—
$_{47}$Ag	98	44,5 (12) с	β^+	—	0,571; 0,679; 0,863
	99	1,8 мин	β^+	4,2	0,264; 0,806; 0,832
	100	2,3 (1) мин	β^+	5,4	0,666; 1,694

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	101	11,1 (3) мин	β^+	3,4; 2,7	0,261; 0,588; 0,667; 1,174
	102	12,9 (3) мин	β^+	2,3	0,56; 0,72; 0,84; 1,74
	102*m*	7,7 (5) мин	э. з. (51), и. п. (49)	—	0,009
	103	65,7 (7) мин	β^+	1,6	0,12*/26/; 0,15/23/; 0,27/34/:
			э. з. (~ 70)	—	0,511 /100, ан./
	103*m*	5,7 (3) с	и. п.	—	0,134
	104	69,2 (10) мин	β^+	0,99	0,556 (84); 0,764 (48); 0,854 (30)
			э. з.	—	
	104*m*	33,5 (20) мин	β^+	2,70	0,511 (120, ан.); 0,556 (100)
			э. з., и. п. (33)	—	0,280 (32); 0,344** (42)
	105	41,29 (7) сут	э. з.	—	0,025
	105*m*	7,23 мин	э. з., и. п. (99,7)	—	0,511 (140, ан.)
	106	24,0 (1) мин	β^+	1,96	0,512 (86); 0,616 (23);
	106*m*	8,46 (10) сут	э. з.	—	0,717** (31);
					0,80**(41); 1,046 (29)
	107	Стабилен	**51,839 (5)**	—	—
	107*m*	44,3 (2) с	и. п.	—	0,093 (5)
	108	2,37 (1) мин	β^- (97,5)	1,64	0,434 (0,45); 0,511 (0,56, ан.);
			э. з. (2,2)	—	0,632 (1,7)
			β^+ (0,28)	0,90	
	108*m*	127 (21) лет	э. з. (91)	—	0,079, 0,434 (89); 0,614 (90);
			и. п. (9)	—	0,723 (90)
	109	Стабилен	**48,161 (5)**	—	—
	110	24,6 (2) с	β^- (99,7)	2,87	0,658 (4,5)
			э. з. (0,3)	—	
	110*m*	249,76 (4) сут	β^- (98,5)	1,5 (0,6); 0,53 (31); 0,087	0,658 (96); 0,764 (23); 0,885 (71);
			и. п.	—	0,937 (32); 1,384 (21)
	111	7,45 (1) сут	β^-	1,05	0,247 (1); 0,342 (6)
	111*m*	64,8 (8) с	и. п. (99,7);	—	0,060
			β^- (0,3)	—	
	112	3,14 (2) ч	β^-	3,94	0,617 (41); 1,40 (5)
	113	5,37 (5) ч	β^-	2,0	0,12/10/; 0,30/100/; 0,67/17/
	113*m*	68,7 (50) с	β^-	1,9; 1,5	0,043; 0,299; 0,316; 0,392
	114	4,6 (2) с	β^-	4,9	0,57
	115	20,0 (5) мин	β^-	3,2	0,14**(12); 0,22**(49);
	116	2,68 (1) мин	β^-	5,0	0,28 (13); 1,48 (11); 2,12 (13)
	116*m*	10,4 (8) с	β^- (~ 98),	—	0,52; 0,70
			и. п. (~ 2)		0,081; 0,514; 0,706; 1,030
	117	72,8 (10) с	β^-	—	0,135; 0,338
	118	3,7 с	β^-	—	0,488; 0,677
	118*m*	2,8 (3) с	β^- (59), и. п. (41)	—	0,128
	119	2,1 (1) с	β^-	—	0,366; 0,399; 0,626
	120	1,17 (5) с	β^-	—	0,506; 0,698
	120*m*	0,32 (4) с	β^- (~ 63),	—	0,203, 0.506: 0,698; 0,926
			и. п. (~ 37)		
	121	0,8 (1) с	β^-	—	0,315; 0,354
	123	0,39 (3) с	β^-, $\beta^- n$	—	—
$_{48}$Cd	100	1,1 (3) мин	β^+	—	0,124—0,935
	101	1,2 (2) мин	э. з., β^+	—	0,098; 0,925; 1,26; 1,72
	102	5,5 (5) мин	э. з., β^+	—	0,415; 0,481; 0,505; 1,037
	103	7,3 (1) мин	э. з., β^+	—	0,22; 0,511 (ан.); 0.63: 0,85
	104	57,7 (10) мин	э. з., β^+	—	0,084; 0,709
	105	55,5 (4) мин	э. з.	—	0,308; 0,320; 0,347; 0,433;
			β^+	1,69	0,511 (ан.);
	106	Стабилен	**1,25 (3)**	—	0,607; 0,962; 1,302; 1,693
					—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	107	6,50 (2) ч	э. з. (> 99)	—	0,511 (0,56, ан.); 0,796 (0,08);
			β^+ (0,28)	0,302	0,829 (0,21)
	108	Стабилен	**0,89 (1)**	—	—
	109	464 (1) сут	э. з.	—	0,088 (4)
	110	Стабилен	**12,49 (9)**	—	—
	111	Стабилен	**12,80 (6)**	—	—
	111*m*	48,6 (3) мин	и. п.	—	0,150 (30); 0,247 (94) 0.396
	112	Стабилен	**24,13 (11)**	—	—
	113	9,3 (19) × × 10^{15} лет	**12,22 (6)**	—	—
			β^-	—	—
	113*m*	14,1 (5) года	β^- (99,9)	0,58	0,264
			и. п. (0,1)	—	
	114	Стабилен	**28,73 (21)**	—	—
	115	53,46 (10) ч	β^-	1,11	0,262 (2); 0,49 (10); 0,53 (26)
	115*m*	44,6 (3) сут	β^-	1.62	0,485 (0,3); 0,935 (1,9); 1,29 (0,9)
	116	Стабилен	**7,49 (9)**	—	—
	117	2,49 (4) ч	β^-	2,23	0,273 (31); 0,345 (18); 0,434 (13); 1,303 (19); 1,577 (17)
	117*m*	3,36 (5) ч	β^-	0,67	0,273 (18); 0,880 (10); 1,24** (11); 1,433 (10); 1,998 (15)
	118	50,3 (2) мин	β^-	~0,8	—
	119	2,69 (2) мин	β^-	—	0,293; 0,343
	119*m*	2,20 (2) мин	β^-	—	0,146; 1,025; 2,021
	120	50,80 (21) с	β^-	—	—
	121	13,5 (3) с	β^-	—	0,324; 0,349; 1,041
	126	0,506 (15) с	β^-	—	0,260: 0,428
	128	0,94 (5) с	—	—	—
$_{49}$In	102	23 (4) с	э. з.	—	0,593; 0,777; 0,861
	103	65 (7) с	β^+	4.4	0,188; 0,202; 0,720; 0,740
	104	25 (6) мин	—	—	—
	105	5,1 (3) мин	β^+	3,9	0,131; 0,260; 0,604
	106	6,2 (1) мин	β^+	2,0	0,511 (ан.); 0,63; 1,65; 1,85
	107	32,4 (3) мин	β^+	2,2	0,22 (46); 0,511 (ан.)
			э. з.	—	0,678
	107*m*	50,4 (6) с	и. п.	—	0,150; 0,175; 0,243;
	108	57 мин	β^+	1,29	0,511 (ан.); 0,633; 0,872
			э. з.	—	
	109	4,2 (1) ч	э. з. (94)	—	0,205; 0,28**; 0,35**; 0,65**;
			β^+ (6)	0,79	0,91**
	109m_1	1,34 (7) мин	и. п.	—	0,650
	109m_2	0,21 (1) с	и. п.	—	0,40 (20); 0,68 (100); 1,04 (20); 1,43 (77)
	110	66 мин	β^+ (71)	2,25	0,511 (142, ан.); 0,658 (95);
			э. з. (29)	—	0,885; 0,937
	111	2,83 (1) сут	э. з.	—	0,173 (89); 0,247 (94)
	111*m*	7,7 (2) мин	и. п.	—	0,537
	112	14,4 (2) мин	β^- (44)	0,66	0,511 (44, ан.); 0,617 (6)
			β^+ (22)	1,56	
			э. з. (34)	—	
	112*m*	20,9 (2) мин	и. п.	—	0,156 (9)
	113	Стабилен	**4,3 (2)**	—	—
	113*m*	1,658 (1) ч	и. п.	—	0,392
	114	71,9 (1) с	β^- (98)	1,988	1,299 (0,17)
			э. з. (1,9)	—	
			β^+ (0,004)	0,42	
	114*m*	49,51 (1) сут	и. п. (96,7)	—	0,190 (17); 0,558 (3,5);
			э. з. (3,3)	—	0,724 (3,5)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	115	$4{,}41 \cdot 10^{14}$ лет	**95,7 (2)**	—	—
			β^-	0,48	—
	115*m*	4,486 (4) ч	и. п. (95)	—	0,336
			β^- (5)	0,83	
	116	14,10 (3) с	β^-	3,3	0,434 (0,12); 0,95 (0,1); 1,293 (1,2)
	$116m_1$	54,15 (6) мин	β^-	1,00	0,417 (36); 1,09 (53); 1,293 (80); 2,111 (20)
	$116m_2$	2,18 (4) с	и. п.	—	0,164; 0,290
	117	43,8 (7) мин	β^-	0,74	0,158(87); 0,565 (100)
	117*m*	116,5 (7) мин	и. п. (47)	—	0,158 (14); 0,315 (31)
			β^- (53)	1,78	
	118	5,0 (3) с	β^-	4,2	1,230 (15)
	119	2,4 (1) мин	β^-	1,6	0,82 (95)
	119*m*	18,0 (3) мин	β^- (95)	2,7	0,024; 0,311; 0,91*
			и. п. (5)	—	
	120	3,2 с	β^-	5,3	1,171 (15)
	121	23,1 (6) с	β^-	2,5	0,262; 0,657; 0,926
	121*m*	3,88 (10) мин	β^- (98,8), н. п. (1.2)	—	0,314
	122	10,0 (5) с	β^-	5	0,99; 1,14
	123	5,98 (6) с	β^-	3,3	1,020; 1,131
	123*m*	47,8 (5) с	β^-	4,5	0,126
	124	3,21 (6) с	β^-	3,9	0,99/3/; 1,13/10/; 3,21/3/
	125	2,33 (4) с	β^-	4,3; 4,1	1,032; 1,335
	126	1,45 (22) с	β^-	4,2	0,909; 1,141
	127	1,15 (5) с	β^-	5,8; 4,9	1,598
	128	0,9 (1) с	β^-	5,0	1,169; 3,520
	129	0,59 (2) с	β^-	6,8; 5,5	1,865; 2,119
	130	0,53 (5) с	β^-, $\beta^- n$	—	0,774; 1.221
$_{50}$Sn	106	2,10 (15) мин	э. з.	—	0,253; 0,387; 0,477
	107	2,90 (5) мин	э. з.	—	1,129
	108	10,30 (8) мин	э. з.	—	0,28; 0,42; 0,67
	109	18,0 (2) мин	э. з.	—	0,335; 0,521; 0,89; 1,12; 1,32; 1,46
			β^+	2,5	
	110	4,11 (10) ч	э. з.	—	0,283 (95)
	111	35,3 (8) мин	э. з. (73)	—	0,511 (54, ан.); 0,75 (1,1); 1,14 (1,8); 1,89 (1,0); 1,92
			β^+ (27)	1,51	
	112	Стабилен	**0,97 (1)**	—	—
	113	115,09 (4) сут	э. з.	—	0,255 (1,8)
	113*m*	21,4 (4) мин	и. п. (91), э. з. (9)	—	0,077 (0,6)
	114	Стабилен	**0,65 (1)**	—	—
	115		**0,36 (1)**	—	—
	116		**14,53 (11)**	—	—
	117		**7,68 (7)**	—	—
	117*m*	13,61 (4) сут	и. п.	—	0,158 (87); 0,315
	118	Стабилен	**24,22 (11)**	—	—
	119		**8,58 (4)**	—	—
	119*m*	293,0 (13) сут	п. п.	—	0,024 (16); 0,090
	120	Стабилен	**32,59 (10)**	—	—
	121	27,06 (4) ч	β^-	0,383	—
	121*m*	55 (5) лет	β^-	0,42	0,037
	122	Стабилен	**4,63 (3)**	—	—
	123	129,2 (4) сут	β^-	1,42	—
	123*m*	40,08 (7) мин	β^-	1,26	0,160
	124	Стабилен	**5,79 (5)**	—	—
	125	9,64 (3) сут	β^-	2,34	0,811 (1,5); 0,904 (1,4); 1,068 (4); 1,97 (0,6)
	125*m*	9,52 (5) мин	β^-	2,04	0,325 (97)
	126	$\sim 1 \cdot 10^5$ лет	β^-	0,3	0,060; 0,067; 0,092
	127	2,10 (4) ч	β^-	3,2	0,823; 1,096; 1,114
	127*m*	4,13 (3) мин	β^-	2,7	0,49 (100)
	128	59,1 (5) мин	β^-	0,80	0,044 (7); 0,072 (19); 0,50 (61); 0,57 (22)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	128m	6,5 (5) с	и. п.	—	0,832; 1,169
	129	2,16 (4) мин	β^-	3,3	0,642; 2,100
	129m	6,7 (4) мин	и. п., β^-	—	—
	130	3,72 (11) мин	β^-	1,5; 1,1	0,192; 0,780
	130m	1,7 (1) мин	β^-	—	0,084; 0,145; 0,311; 0,899
	131	61 (3) с	β^-	3,4	0,305; 0,450; 1,23
	132	40 (1) с	β^-	1,8	0,085; 0,247; 0,340; 0,899 0,992
	134	1,04 (2) с	β^-, $\beta^- n$ ($\sim$ 17)	—	—
$_{51}$Sb	109	18,3 (5) с	β^+	5,4; 4,4	0,925; 1,062; 1,496
	110	23,0 (4) с	β^+	6,9	0,827; 0,985; 1,212; 1,243
	111	75 (1) с	β^+	3,3	0,154; 0,489
	112	51,4 (5) с	β^+	4,8	0,511 (ан.); 1,26
	113	6,67 (7) мин	э. з. β^+	— 2,42	} 0,32; 0,511 (ан.); 1,03; 1,2*
	114	3,49 (3) мин	э. з. β^+	— 4,0	} 0,9; } 1,30
	115	32,1 (3) мин	э. з. (67) β^+ (33)	— 1,5	} 0,499 (100); 0,511 (67, ан.); } 0,98 (5); 1,24 (5)
	116	15,8 (8) мин	э. з. (72) β^+ (28)	— 2,3	} 0,511 (56, ан.); 0,93 (26); } 1,293 (85); 2,23 (14)
	116m	60,3 (6) мин	э. з. (81) β^+ (19)	— 1,16	} 0,099 (30); 0,140 (30); 0,406 (36); 0,511 (38, ан.); } 0,545 (68); 0,96 (75); 1,06 (27); 1,293 (100)
	117	2,80 (1) ч	э. з. (97,4) β^+ (2,6)	— 0,57	} 0,158 (87); 0,511 (5, ан.)
	118	3,6 (1) мин	э. з. β^+	— 2,67	} 0,511 (150, ан.) 0,83 (0,4); } 1,230*(3)
	118m	5,00 (1) ч	э. з. ($>$ 99) β^+ (0,16)	— —	} 0,041 (29); 0,254 (93); } 1,049 (100); 1,230 (100)
	119	38,1 (2) ч	э. з.	—	0,024 (16)
	120	15,89 (4) мин	β^+ э. з.	1,70 —	} 0,511 (87, ан.); 1,171 (1,3)
	121	Стабилен	**57,3 (9)**	—	—
	122	2,70 (1) сут	β^- (97) э. з. (3) β^+ (0,006)	2,0; 1,4 — 0,56	} 0,564 (66); 0,686 (3,4)
	123	Стабилен	**42,7 (9)**	—	—
	124	60,20 (3) сут	β^-	2,31	0,603 (97); 0,72*(14); 1,691 (50)
	124m_1	93 (5) с	и. п. (80) β^- (20)	— 1,19	} 0,505 (20); 0,603 (20); 0,644 (20)
	124m_2	20,2 (2) мин	и. п.	—	0,035
	125	2,73 (3) года	β^-	0,61	0,427 (31); 0,463 (10); 0,599*(24); 0,634 (11)
	126	12,4 (1) сут	β^-	1,9	0,41; 0,69**
	126m	19,0 (3) мин	β^- (86), и. п. (14)	—	0,018
	127	3,85 (5) сут	β^-	1,5	0,46; 0,68; 0,77
	128	9,01 (3) ч	β^-	2,0	0,320 (83); 0,75*(200)
	129	4,40 (1) ч	β^-	2,2; 0,6	0,54; 0,81; 0,91
	130	40 (1) мин	β^-	2,9	0,19; 0,33; 0,82**; 0,94
	130m	6,3 (2) мин	β^-	3,2; 2,2	0,182; 0,840
	131	23 (2) мин	β^-	3,0; 1,3	0,64 (37); 0,94 (48)
	132	4,2 (1) мин	β^-	3,7	0,104; 0,151; 0,697; 0,974
	133	2,7 (1) мин	β^-	2,4; 1,2	0,837; 1,096; 1,729; 2,416; 2,755
	135	$\sim$ 2 с	β, $\beta^- n$ (20)	—	1,279
	136	0,82 (2) с	β^-, $\beta^- n$ (32)	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{52}$Te	108	2,1 (1) с	α	3,32	—
	109	4,6 (3) с	э. з., p β^+, β^+p, α	2,6; 3,4; 3,7	—
	110	18,6 (8) с	β^+, α	—	—
	111	19,3 (4) с	β^+, β^+p	—	0,108; 0,219; 0,606; 0,895
	112	2,0 (2) мин	β^+	—	0,851; 0,881; 1,268; 1,392
	113	1,7 (2) мин	β^+	4,7	0,296; 0,373; 0,419 0,645; 0,814; 1,018; 1,181
	114	15,2 (7) мин	β^+	—	0,84; 0,90; 0,245; 0,727; 1,897
	115	5,8 (2) мин	э. з. (~ 20) β^+ (~ 80)	—	0,511 (160, ан.); 0,72 (34);
	115m	6,7 (4) мин	э. з.	2,8	1,28 (32); 1,38 (32)
	116	2,49 (4) ч	э. з.	—	—
	117	62 (2) мин	э. з. (70) β^+ (30)	—	0,094, 0,103 0,511 (60, ан.); 0,72 (65);
	117m	0,103 (3) с	и. п.	1,81	0,93 (6); 1,78 (9)
	118	6,00 (2) сут	э. з.	—	—
	119	16,05 (5) ч	э. з.	—	—
	119m	4,69 (4) сут	β^+ (5) β^+	0,627	0,645 (85); 0,70 (11); 1,76 (3,6)
	120	Стабилен	**0,096 (2)**	—	0,153 (62); 0,270 (25); 1,221 (67); 2,09 (4)
	121	16,78 (35) сут	э. з.	—	—
	121m	154 (7) сут	и. п. (90) э. з. (10)	—	0,508 (18); 0,573 (80)
	122	Стабилен	**2,60 (1)**	—	0,212 (82); 1,10 (3)
	123	$> 1 \cdot 10^{13}$ лет	**0,908 (3)**	—	—
	123m	119,7 (1) сут	и. п.	—	—
	124	Стабилен	**4,816 (8)**	—	0,159 (84)
	125		**7,14 (1)**	—	—
	125m	58 (1) сут	и. п.	—	—
	126	Стабилен	**18,95 (1)**	—	0,035 (7); 0,110 (0,3)
	127	9,35 (7) ч	β^-	0,70	—
	127m	109 (2) сут	и. п. (97,6), β^- (2,4)	—	0,058 (0,01); 0,21*(0,03); 0,360 (0,05); 0,417 (0,3) 0,059 (0,19); 0,088 (0,08);
	128	$> 8 \cdot 10^{24}$ лет	**31,69 (2)**	—	0,67 (0,004)
	129	69,6 (3) мин	β^-	—	—
	129m	33,6 (1) сут	и. п. (63) β^- (37)	1,45	0,027 (19); 0,455 (15)
	130	2,51 (27) × $\times 10^{21}$ лет	**33,80 (2)**	—	0,69; 0,106
	131	25,0 (1) мин	β^-	1,60	—
	131m	30 (2) ч	β^- (78) и. п. (22)	2,14	0,150 (68); 0,453 (16)
	132	78,2 (8) ч	β^-	2,46 (5); 0,9	0,78**(60); 0,85*(31);
	133	12,45 (28) мин	β^-	—	1,127 (13); 1,206 (11)
	133m	55,4 (4) мин	β^- (83) и. п. (17)	0,22 3,2; 2,8	0,053 (17); 0,230 (90) 0,312; 0,408; 1,333
	134	41,8 (8) мин	β^-	2,4	0,432 (50); 0,557 (35);
	135	18 (1) с	β^-	—	0,754 (85); 0,91 (57)
	136	20,7 (20) с	β^-, β^-n (0,7)	0,7	0,08 (13); 0,17 (16); 0,204 (21); 0,262 (19)
	137	3,5 (5) с	β^-, β^-n (2,5)	6,0; 5,4	0,267; 0,604; 0,870
	138	1,4 (4) с	β^-, β^-n (6)	—	—
$_{53}$I	111	2,5 (2) с	α	—	0,244
	112	3,42 (11) с	β^+, α	—	—
	114	2,1 (2) с	β^+	3,152	0,117; 0,321; 0,341; 0,266
	115	1,3 (2) мин	β^+	—	0,689; 0,787; 0,795; 1,143
	116	2,91 (15) с	β^+	6,5	0,682; 0,709; 0,775; 1,091
	117	2,3 (1) мин	β^+	—	—
	118	13,7 (5) мин	β^+ (~ 54) э. з. (~ 46)	6,7 3,5 5,5	0,540; 0,679 0,16; 0,34; 0,511 (ан.) 0,511 (108, ан.); 0,55; 0,60;
				—	1,15; 1,34

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	118*m*	8,5 (5) мин	э. з., и. п.	—	0,104; 0,60
	119	19,1 (4) мин	э. з. (49) β^+ (51)	— 2,4	0,26; 0,511 (102, ан.); 0,78
	120	81,0 (6) мин	э. з. (54) β^+ (46)	— 4,6	0,511 (92, ан.); 0,56; 0,62; 1,52
	120*m*	53 (4) мин	β^+	3,8	0,56; 0,60; 0,61
	121	2,12 (1) ч	э. з. (91) β^+ (9)	— 1,2	0,212 (90); 0,32 (6); 0,511 (18, ан.)
	122	3,62 (6) мин	β^+	3,1	0,511 (ан.); 0,564; 0,69; 0,78
	123	13,2 (1) ч	э. з.	—	0,159 (83)
	124	4.18 (2) сут	э. з. (74) β^+ (26)	— 2,14	0,511 (50, ан.); 0,605 (67); 0,644(12); 0,73 (14); 1,69 (14)
	125	60,14 (11) сут	э. з.	—	0,035 (7)
	126	13,02 (7) сут	э. з. (55) β^- (44) β^+ (1,3)	— 1,25 1,13	0,386 (34); 0,667 (33)
	127	Стабилен	100	—	—
	128	24,99 (2) мин	β^- (93,6) э. з. (6,4)	2,12 —	0,441 (14); 0,528 (1,4)
	129	1,57 (4) × × 10^7 лет	β^-	0,150	0,040 (9)
	130	12,36 ч	β^-	1.7 (0,4); 1,04	0,419 (35); 0,538 (99); 0,669 (100); 0,743 (87)
	130*m*	9,0 (1) мин	н. п. (83), β^- (17)	—	0,048; 0,536
	131	8,04 (1) сут	β^-	0,806 (0,6); 0,606	0,284 (5,4); 0,364 (82); 0,637 (6,8)
	132	2,30 (3) ч	β^-	2,12	0,52**(20); 0,67**(144); 0,773 (89); 0,955 (22)
	132*m*	83,6 (7) мин	и. п. (86), β^- (14)	—	0,175; 0,60; 0,67; 0,77
	133	20,8 (1) ч	β^-	1,27	0,53 (90)
	133*m*	9 с	н. п.	—	0,073; 0,647; 0,913
	134	52,6 (4) мин	β^-	2,43	0,61 (18); 0,85 (95); 0,89 (65); 1,15 (10)
	134*m*	3,69 (7) мин	и. п. (98), β^- (2)	—	0,316; 0,847; 0,884
	135	6,61 ч	β^-	2,2; 1,4	1,14 (37); 1,28 (34); 1,46 (12); 1,72 (19)
	136	84 (1) с	β^-	7,0 (6); 5,6	0,27 (18); 0,39 (19); 1,32** (95.; 2,3** (19)
	137	24,5 (2) с	β^-, $\beta^- n$ (6)	—	0,601; 1,218
	138	6,41 (6) с	β^-, $\beta^- n$ (5)	—	0,484; 0,589; 0,875; 2,262
	139	2,30 (5) с	β^-, $\beta^- n$ (10)	—	0,528; 0,537; 0,571; 0,848
	140	0,86 (4) с	β^-, $\beta^- n$ (14)	—	0,377; 0,458
	141	0,41 (8) с	β^-	—	0,192; 0,303; 0,387; 0,579
$_{54}$Xe	112	2,8 (2) с	α	3,210	—
	114	10,0 (4) с	β^+	—	0,104; 0,162; 0,309; 0,440
	116	56 (2) с	β^+	3,3	0,248; 0,311
	117	61 (2) с	β^+, $\beta^+ p$ (0,003)	—	0,221; 0,295; 0,519; 0,661
	119	5,8 (3) мин	β^+	—	0,10; 0,23; 0,46
	120	40 (1) мин	β^+	—	0,055; 0,073; 0,176; 0,76
	121	40,1 (20) мин	β^+	2,8	0,080; 0,096; 0,132; 0,437; 0,511 (ан.)
	122	20,1 (1) ч	э. з.	—	0,060; 0,090; 0,110; 0,148; 0,180; 0,345; 0,417
	123	2,08 (2) ч	β^+, э. з.	—	0,090; 0,110; 0,149; 0,178; 0,329; 0,511 (ан.); 0,68; 0,90; 1,10
	124	Стабилен	0,10 (1)	—	—
	125	16,9 (2) ч	э. з., β^+	—	0,055; 0,188; 0,242
	125*m*	57 (1) с	и. п.	—	0,075; 0,111; 0,140
	126	Стабилен	0,09 (1)	—	—
	127	36,4 (1) сут	э. з.	—	0,172 (22); 0,203 (65); 0,375 (20)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	127*m*	69,2 (9) с	и. п.	—	0,125; 0,175
	128	Стабилен	**1,91 (3)**	—	—
	129	Стабилен	**26.4 (6)**		
	129*m*	8,89 (2) сут	и. п.	—	0,040 (9); 0,197 **(6)**
	130	Стабилен	**4,1 (1)**	—	—
	131	Стабилен	**21,2 (4)**	—	—
	131*m*	11,9 (1) сут	и. п.	—	0,164 (2)
	132	Стабилен	**26,9 (5)**	—	—
	133	5,29 (1) сут	β^-	0,346	0,081 (37)
	133*m*	2,19 (1) сут	и. п.	—	0,233 (14)
	134	Стабилен	**10,4 (2)**	—	—
	135	9,083 ч	β^-	0,92	0,250 (91); 0,61 (3)
	135*m*	15.6 мин	и. п. (> 99), β^- (0,004)	—	0,527
	136	Стабилен	**8,9 (1)**	—	—
	137	3,818 (13) мин	β^-	4,1	0,455 (33)
	138	14,08 (8) мин	β^-	2,8	0,16/33/; 0,26/**100**/; 0,42/40/; 1,78/66/; 2,02/58/
	139	39,68 (14) с	β^-	5,0	0,18/41/; 0,22/**100**/; 0,30/57/; 1,15/23/
	140	13,60 (10) с	β^-	2,6	0,622; 0,806; 1,315; 1,414
	141	1,72 (3) с	β^-, $\beta^- n$ (0,05)	—	0,106; 0,119; 0,909
	142	1,22 (2) с	β^-, $\beta^- n$ (0,41)	—	0,54; 0,57; 0,62; **0,66**
	144	1,15 (20) с	β^-	—	—
	145	0,9 (3) с	β^-	—	—
$_{55}$Cs	117	8 (2) с	—	—	—
	118	16,4 (12) с	β^+, $\beta^+ p$ (0,04)	—	—
	120	60,2 (15) с	β^+	—	0,332
	121	125,6 (14) с	β^+	—	—
	122	4,5 (2) мин	э. з.	—	—
	123	5,87 (5) мин	β^+	3.1	0,097; 0,597
	123*m*	1,60 (15) с	и. п.	—	0,64; 0,95
	124	26,5 (15) с	β^+	4,9	0,354; 0,493; 0,915
	125	45 (1) мин	э. з. **(51)**	—	0,112; 0,511 **(98, ан.)**
			β^+ **(49)**	2,05	
	126	1,64 (2) мин	β^+ (82)	3,8	0,386(38); 0,511 **(164, ан.)**;
			э. з. (18)	—	0,925
	127	6,25 (10) ч	э. з. (96,5)	—	0,125 (10); 0,406 **(72)**;
			β^+ (3,5)	1,08	0,511 (7, ан.)
	128	3,62 (2) мин	β^+ (51)	2,9	0,441 (27); 0,511 **(110, ан.)**
			э. з. (49)	—	
	129	32,06 (6) ч	э. з.	—	0,375 (48); 0,416 **(25)**; 0,550 **(5)**
	130	29,9 мин	β^+	1,97	0,54; 0,59
			э. з.	—	
			β^- (1,6)	0,442	
	131	9,69 (1) сут	э. з.	—	—
	132	6,475 (10) сут	э. з. (97)	—	0,48* (4); 0,668 **(99)**
			β^+ (0,6)	0,40	
			β^- (2)	0,8	
	133	Стабилен	**100**	—	—
	134	2.062 (5) года	β^-	0,662	0,57**(23); 0.605 **(98)**; 0,796** (99)
	134*m*	2,91 (1) ч	и. п.	—	0,127 (14)
			β^- **(1)**	0,55	
	135	$2{,}3 \cdot 10^6$ лет	β^-	0,21	—
	135*m*	53 (2) мин	и. п.	—	0,781 (100); 0,840 **(96)**
	136	13,16 (3) сут	β^-	0,657 (7); 0,341	0,16** (36); 0,340 **(53)**; 0,818 (100); 1,05 **(82)**
	137	30,0 (2) лет	β^-	1,176 (7); 0,514	0,662 (85)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	138	32,2 (1) мин	β^-	3,40	0,463 (23); 1,01 (25); 1,426 (73); 2,21 (18)
	138*m*	2,90 (10) мин	и. п. (75), β^- (25)	—	0,080; 0,463; 1,436
	139	9,27 (5) мин	β^-	4,2	1,28; 1,42
	140	63,7 (3) с	β^-	6,2; 5,6	0,59; 0,88; 1,14; 1,62; 1, 85; 2,06; 2,32; 2,72; 3,15
	141	24,94 (6) с	β^-, β^-n (0,05)	—	0,048; 0,562; 0,589; 1,194
	142	1,80 (8) с	β^-, β^-n (0,28)	—	0,360; 0,967; 1,326
	143	1,78 (3) с	β^-, β^-n (1,7)	—	0,196; 0,232; 0,306
	144	1,02 (3) с	β^-, β^-n (3)	—	0,20; 0,56; 0,64; 0,76
	145	0,59 (1) с	β^-, β^-n (12)	—	0,11; 0,18; 0,20
	146	0,189 (11) с	β^-, β^-n (14)	—	—
$_{56}$Ba	117	1,9 (2) с	э. з., *p*	—	—
	119	5,35 (30) с	э. з., *p*	—	—
	121	29,7 (15) с	β^+, β^+p (0,02)	—	—
	123	2,7 (4) мин	β^+	—	0,094; 0,116; 0,124
	124	11,9 (10) мин	э. з.	—	0,17; 0,19; 0,27; 1,22
	125	3,5 (4) мин	β^+	3,4	0,08; 0,14
	126	100 (2) мин	β^+	—	0,23/100/; 0,70/33/
	127	12,7 (4) мин	β^+	2,4	0,07; 0,12; 0,18
	128	2,43 (5) сут	э. з.	—	0,134; 0,278
	129	2,23 (11) ч	э. з. (94) β^+ (6)	— / 1,42	0,129/26/; 0,182/100/; 0,21**/65/; 1,45/42/
	130	Стабилен	**0,106 (2)**	—	—
	131	11,8 (2) сут	э. з.	—	0,124** (28); 0,216 (19); 0,373 (13); 0,496** (48)
	131*m*	14,6 (2) мин	и. п.		
	132	Стабилен	**0,101 (2)**	—	0,107 (40)
	133	10,5 (2) года	э. з.	—	—
	133*m*	38,9 (1) ч	и. п. (> 99), э. з. (0,011)	—	0,080** (36); 0,303 (14); 0,356 (69)
	134	Стабилен	**2,417 (27)**	—	0,276 (17)
	135	Стабилен	**6,592 (18)**	—	—
	135*m*	28,7 (2) ч	и. п.	—	—
	136	Стабилен	**7,854 (39)**	—	0,268 (16)
	137	Стабилен	**11,23 (4)**	—	—
	137*m*	2,5513 (7) мин	и. п.	—	—
	138	Стабилен	**71,70 (7)**	—	0,662 (89)
	139	84,6 (4) мин	β^-	2,3	—
	140	12,746 (10) сут	β^-	1,02	0,166 (23); 1,43 (0,4)
	141	18,27 (7) мин	β^-	3,0	0,030 (11); 0,537 (34)
	142	10,6 (2) мин	β^-	1,7	0,193/100/; 0,28/50/; 0,46**/30/; 0,64/20/ 0,080/30/; 0,26/100/; 0,89/40/: 1,20/35/
	143	14,5 (5) с	β^-	4,2	0,211; 0,799; 0,980; 1,011
	144	11,4 (5) с	β^-	2,9; 2,4	0,10; 0,16; 0,39; 0,43
	145	4,31 (16) с	β^-	4,9	0,09; 0,38; 0,42
	146	1,91 (16) с	β^-	3,9	0,12; 0,14; 0,25
	148	0,47 (20) с	β^-	—	0,13; 0,42; 0,55
$_{57}$La	123	17 (3) с	β^+	—	0,093
	125	76 (6) с	β^+	—	0,068
	126	1,0 (3) мин	β^+	—	0,256; 0,511 (ан.)
	127	3,8 (5) мин	β^+	—	0,056
	128	5,0 (3) мин	β^+	3,2	0,279; 0,511 (ан.)
	129	11,6 (2) мин	э. з., β^+	2,7; 2,4	0,11; 0,25; 0,28; 0,46
	129*m*	0,56 (5) с	и. п.	—	0,172
	130	8,7 (1) мин	э. з., β^+	—	0,356; 0,45; 0,511 (ан); 0,55; 0,72; 0,81; 0,91; 1,01; 1,19; 1,45; 1,55
	131	59 (2) мин	э. з. (72) β^+ (28)	— / 1,94	0,115 (23); 0,364 (20); 0,417 (20); 0,511 (56, ан.)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	132	4,8 (2) ч	β^+	3,7; 3,2	0,47; 0,511 (ан.); 0,56; 0,66; 1,03; 1,22; 1,58; 1,91
	133	3,912 (8) ч	э. з. β^+	— 1,2	0,511 (ан.); 0,62; 0,63
	134	6,45 (16) мин	э. з. (38) β^+ (62)	— 2,7	0,511 (124, ан.); 0,605 (6)
	135	19,5 ч	э. з.	—	0,481 (1,9); 0,588 (0,13); 0,87** (0,24)
	136	9,87 (3) мин	э. з. (67) β^+ (33)	— 1,9	0,511 (66, ан.); 0,818 (2,5)
	137	6 (2)·10⁴ лет	э. з.	—	—
	138	1,28 (12) × × 10¹¹ лет	**0,09 (1)** э. з. (~ 68) β^- (~ 32)	— —	—
	139	Стабилен	**99,91 (1)**	0,21	0,81 (30); 1,436 (70)
	140	40,272 (7) ч	β^-	—	—
	141	3,93 (5) ч	β^-	2,175 (6); 1,69 (15); 1,36	0,329 (20); 0,487 (40); 0,815 (19); 0,923 (10); 1,596 (96); 2,53 (3)
	142	92,5 (5) мин	β^-	2,43 4,51	1,36 (2) 0,65 (48); 0,90 (9); 1,91 (9); 2,41 (15); 2,55 (11)
	143	14,23 (14) мин	β^-	3,3	0,62/100/; 0,80/44/; 1,07/26/; 1,17/57/; 1,58/28/; 1,98/35/; 2,56/27/
	144	40,9 (4) с	β^-	4,4; 4,1	0,397; 0,541; 0,845
	145	24,8 (20) с	β^-	—	0,12; 0,17; 0,36; 0,45; 1,82
	146	8,8 (4) с	β^-	5,5; 4,5	0,259; 0,410; 0,503
	147	4,4 (5) с	β^-	—	—
	148	1,29 (8) с	β^-	—	0,159
$_{58}$Ce	125	11 (4) с	β^+	—	—
	128	~ 6 мин	—	—	—
	129	3,5 (5) мин	—	—	0,080; 0,32; 0,75
	130	25 (2) мин	—	—	0,13
	131	10 (1) мин	β^+	—	—
	132	4,2 (2) ч	э. з.	—	0,18; 0,22
	133	5,40 (5) ч	э. з., β^+	—	0,511 (ан.); 1,8
	134	75,9 (9) ч	э. з.	—	—
	135	17,6 ч	э. з.	—	0,265/100/; 0,300/56/; 0,52**/46/; 0,59**/98/
	135m	20 с	β^+ (< 1) и. п.	0,81	0,082; 0,150; 0,296
	136	Стабилен	**0,19 (1)**	—	—
	137	9,0 (3) ч	э. з. (> 99) β^+ (≪ 0,01)	—	0,446**(2,3); 0,481**(0,06); 0,698 (0,04); 0,92** (0,1)
	137m	34,4 (3) ч	и. п. (99,2) э. з. (0,8)	—	0,168 (0,4); 0,254 (11); 0,762 (0,16); 0,825**(0,5)
	138	Стабилен	**0,25 (1)**	—	—
	139	137,66 (13) сут	э. з.	—	0,165 (80)
	139m	56,4 (5) с	и. п.	—	0,746 (93)
	140	Стабилен	**88,48 (10)**	—	—
	141	32,50 (1) сут	β^-	0,581	0,145 (48)
	142	> 5·10¹⁶ лет	**11,08 (10)**	—	—
	143	33,0 (2) ч	β^-	1,39	0,057 (11); 0,293 (46); 0,668 (7); 0,725 (8)
	144	284,9 (2) сут	β^-	0,31	0,080 (2); 0,134 (11)
	145	2,98 (15) мин	β^-	2,0	0,063; 0,285; 0,440; 0,724; 1,148
	146	14,2 (5) мин	β^-	0,7	0,110/20/; 0,142/42/; 0,22/50/; 0,27/12/; 0,32/100/
	147	56,4 (12) с	β^-	3,3	0,093; 0,269; 0,374; 0,580
	148	48 (1) с	β^-	1,7	0,098, 0,121; 0,292
	151	1,02 (6) с	β^-	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{59}$Pr	133	6,5 (3) мин	э. з.	—	0,74; 0,134; 0,361; 0,465
	134	17 (2) мин	э. з.	—	0,22; 0,30; 0,409; 0,511 (ан.); 0,639; 0,96
	135	~ 22 мин	β^+ э. з.	2,5 —	0,080; 0,22; 0,30; 0,511 (ан.)
	136	13,1 (1) мин	э. з. (~ 67) β^+ (~ 33)	— 3,5; 3,0	0,511 (66, ан.); 0,540; 1,092
	137	1,28 (3) ч	э. з. (73) β^+ (27)	— 1,7	0,511 (54, ан.); 0,837
	138	1,45 (5) мин	β^+	—	0,789
	138*m*	2,1 (1) ч	э. з. (77) β^+ (23)	— 1,65	0,298 (77); 0,364 (9); 0,511 (46, ан.); 0,79 (100); 1,04 (100)
	139	4,41 (4) ч	э. з. (89) β^+ (11)	— 1,09	0,511 (18, ан.); 1,35 (0,5); 1,61 (0,3)
	140	3,39 (1) мин	э. з. (50) β^+ (50)	— 2,32	0,511 (100, ан.); 1,596 (0,3)
	141	Стабилен	100	—	—
	142	19,13 (4) ч	β^- (> 99); э. з. (0,016)	2,16	1,57 (3,7)
	142*m*	14,6 (5) мин	и. п.	—	—
	143	13,58 (3) сут	β^-	0,933	—
	144	17,28 (5) мин	β^-	2,99	0,695 (1,5); 1,487 (0,29); 2,186 (0,7)
	144*m*	7,2 (2) мин	и. п. (99,96), β^- (0,04)	—	0,059
	145	5,98 (2) ч	β^-	1,80	0,072; 0,68; 0,75; 0,92; 1,05; 1,16
	146	24,07 (13) мин	β^-	4,1	0,455 (77); 0,74 (16); 0,78 (15); 1,51 (27)
	147	13,6 (5) мин	β^-	2,7; 2,1	0,078 (17); 0,127 (9); 0,32** (47); 0,56 (39); 0,61 (10); 0,65 (24); 1,26 (11)
	148	2,30 (3) мин	β^-	5,0;4,7	0,30; 1,36
	149	2,3 (2) мин	β^-	2,8	0,08; 0,155; 0,325; 0,36; 0,745
	150	6,19 (16) с	β^-	—	0,130; 0,723
	151	4,0 (7) с	β^-	—	—
$_{60}$Nd	134	8,5 (15) мин	β^+	—	0,163
	135	12,1 мин	э. з.	—	0,204; 0,441; 0,502
	136	50,65 (33) мин	э. з.	—	0,109; 0,149; 0,575
	137	38,5 (15) мин	β^+	2,4	0,109; 0,511 (ан.); 0,55**
	137*m*	1,60 (15) с	и. п.	—	0,178; 0,286
	138	5,04 (9) ч	э. з.	—	0,326
	139	29,7 (5) мин	э. з.	—	0,41; 1,07
	139*m*	5,5 (2) ч	и. п. (12), э. з. β^+	— 3,1	0,114/80/; 0,327/50/; 0,511/1400/; 0,73**/210/; 0,82**/70/; 0,983/70/
	140	3,37 (2) сут	э. з.	—	—
	141	2,49 (3) ч	э. з. (90) β^+ (4)	— 0,79	0,145 (0,2); 0,511 (6, ан.); 1,14 (2); 1,30 (1)
	141*m*	62,4 (9) с	и. п. (99,97), э. з. (0,03)	—	0,756
	142	Стабилен	27,13 (10)	—	—
	143		12,18 (5)	—	—
	144	$2{,}4 \cdot 10^{15}$ лет	23,80 (10) α	— 1,83	—
	145	$> 1 \cdot 10^{17}$ лет	8,30 (5)	—	—
	146	Стабилен	17,19 (8)	—	—
	147	10,98 (1) сут	β^-	0,9; 0,81	0,091 (28); 0,319 (3); 0,43**(4); 0,533 (13)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	148	Стабилен	**5,76 (3)**	—	—
	149	1,73 (1) ч	β^-	1,5	0,114 (18); 0,210 (27); 0,27** (26); 0,541 (10)
	150	Стабилен	**5,64 (3)**	—	—
	151	12,44 (2) мин	β^-	2,3; 1,2	0,118 (40); 0,174** (10); 0,256 (11); 1,180 (9)
	152	11,4 (2) мин	β^-	1,2; 0,9	0,250; 0,279
	154	40 (10) с	β^-	—	0,40; 0,70
$_{61}$Pm	136	107 (6) с	э. з.	—	0,374; 0,603; 0,815; 0,858
	137	2,4 (1) мин	э. з.	—	0,108; 0,178; 0,269; 0,581
	138	3,24 (5) мин	э. з.	—	0,521; 0,729
	139	4,15 (5) мин	β^+	3,0	0,368; 0,403; 0,463
	140	9,2 (2) с	β^+	5,1	0,717; 0,774; 1,499
	141	20,90 (5) мин	β^+ (57) э. з. (43)	2,6 —	0,195 (13); 0,511 (114, ан.)
	142	40,5 (5) с	β^+ ($\sim$ 95) э. з. ($\sim$ 5)	3,78 —	0,511 (190, ан.); 1,576
	143	265 (7) сут	э. з.	—	0,742 (47)
	144	363 (14) сут	э. з.	—	0,474 (45); 0,615 (99); 0,695 (99)
	145	17,7 (4) года	э. з. ($>$ 99) α ($3\cdot10^{-7}$)	— 2,24	0,067 (1,0); 0,072 (2,3)
	146	2020 (18) сут	э. з. (63) β^- (37)	— 0,78	0,453 (65); 0,75* (65)
	147	2,6234 (2) года	β^-	0,224	—
	148	5,37 (1) сут	β^-	2,48	0,551 (27); 0,914 (15); 1,465 (23)
	148*m*	41,3 (1) сут	β^- (95) и. п. (5)	1,0; 0,4 —	0,551 (95); 0,630 (87); 0,727 (36); 0,137
	149	53,08 (5) ч	β^-	1,07	0,286 (2); 0,58 (0,1); 0,85 (0,2)
	150	2,68 (2) ч	β^-	3,05	0,334 (71); 0,831 (18); 1,165 (23); 1,33 (22)
	151	28,40 (4) ч	β^-	1,19	0,17** (18); 0,340 (21)
	152	4,1 (1) мин	β^-	3,5	0,122; 0,841; 0,96*
	152*m*	7,5 (2) мин	β^-	—	0,120; 0,245
	153	5,4 (2) мин	β^-	1,65	0,12; 0,18
	154	2,7 (1) мин	β^-	2,5	0,08; 0,18; 1,44
$_{62}$Sm	134	12 (3) с	—	—	—
	137	44 (8) с	—	—	—
	138	3,0 (3) мин	β^+	—	0,05; 0,075
	139	2,57 (1) мин	β^+	3,6	0,274; 0,306; 0,597
	139*m*	9,5 (1) с	и. п. (93,7), э. з. (6,3)	—	0,155; 0,189
	140	14,82 (10) мин	β^+	1,9	0,23; 0,14
	141	10,2 (2) мин	э. з., β^+	—	0,20; 0,43; 0,78
	141*m*	22,6 (2) мин	э. з. (99,69), и. п. (0,31)	—	—
	142	72,49 (5) мин	э. з. ($\sim$ 50) β^+ ($\sim$ 50)	— 1,03	0,15—0,35**; 0,511 (100, ан.)
	143	8,83 (2) мин	э. з. (52) β^+ (48)	— 2,5	0,511 (100, ан.); 1,06
	143*m*	66 (2) с	э. з. (0,20), и. п. (99,80)	—	0,754
	144	Стабилен	**3,1 (1)**	—	—
	145	340 (3) сут	э. з.	—	0,061; 0,485
	146	1,03 (3) $\times$ $\times$ 10^8 лет	$<$ **$2\cdot10^{-7}$**, α	2,47	—
	147	1,06 (2) $\times$ $\times$ 10^{11} лет	**15,0 (2)** α	— 2,23	— —
	148	8 (2)·10^{15} лет	**11,3 (1)** α	— **1,96**	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	149	$> 1{,}10^{16}$ лет	13,8 (1)	—	—
	150	Стабилен	7,4 (1)	—	—
	151	90 (6) лет	β^-	0,076	0,022 (4)
	152	Стабилен	26,7 (2)	—	—
	153	46,7 (1)	β^-	0,80	0,070 (5,4); 0,103 (28)
	154	Стабилен	22,7 (2)	—	—
	155	22,1 (2) мин	β^-	1,53	0,104 (73); 0,246 (4)
	156	9,4 (2) ч	β^-	0,72	0,088 (30); 0,166 (10); 0,204 (20)
	157	8,0 (5) мин	β^-	2,4	0,20; 0,39
	158	5,54 (9) мин	β^-	—	0,19; 0,32; 0,36
$_{63}$Eu	139	22 (3) с	β^+	—	—
	141	40,0 (7) с	β^+	5.0	0,39*; 0,59
	141*m*	3,3 (3) с	э. з. (67), и. п. (33)	—	0,096
	142	2,4 (2) с	β^+	7,0	0,77
	142*m*	1,22 (2) мин	э. з., β^+	4,8	0,77; 1,03
	143	2,63 (5) мин	β^+	4,1	0,511 (ан.); 1,11; 1,54; 1,80; 1,91
	144	10,2 (1) с	β^+	5,2	0,511 (ан.); 0,818; 1,660
	145	5,93 (4) сут	э. з. (99) β^+ (1)	— 1,7 [2]	0,656/30/; 0,894/100/; 1,66/16/
	146	4,61 (24) сут	э. з. (96,5) β^+ (3,5)	— 2,11 (0,14); 1,47 (3,3)	0,511 (7, ан.); 0,634* (77); 0,749 (100)
	147	24 (1) сут	э. з. (99,5) β^+ (0.5) α (0,002)	— — 2,91	0,122 (20); 0,198 (24); 0,680 (11); 0,957 (9); 1,079 (9)
	148	54,5 сут	э. з. (> 99) β^+ (0,13) α ($9 \cdot 10^{-7}$)	— 0,92 2,63	0,551** (120); 0,62** (90); 0,72** (18)
	149	93,1 (4) сут	э. з.	—	0,277/10/; 0,328/10/
	150	12,62 (10) ч	β^- (90) э. з. (9) β^+ (0,4)	1,01 — 1,24	0,334 (4); 0,406 (3); 0,511 (0,8, ан.)
	151	Стабилен	47,8 (5)	—	—
	152	13,33 (4) года	э. з. (73) β^- (27) β^+ (0,021)	— 1,48 0,71	0,122 (37); 0,344 (77); 0,965 (15); 1,408 (22)
	152m_1	9,32 (1) ч	β^- (76) э. з. (24) β^+ (0,011)	1,88 — 0,89	0,046; 0,122 (8); 0,842 (13); 0,963 (12)
	152m_2	96 (1) мин	и. п.	—	0,090; 0,148
	153	Стабилен	52,2 (5)	—	—
	154	8,8 (1) года	β^- (99,98), э. з. (0,02)	1,85 (10); 0,87	0,123 (38); 0,724 (21); 0,876 (12); 1,00* (31); 1,278 (37)
	154*m*	46,0 (3) мин	и. п.	—	0,068; 0,101
	155	4,96 (1) года	β^-	0,25	0,087 (32); 0,105 (20)
	156	15,19 (6) сут	β^-	2,45	0,089 (8); 0,812 (9); 1,07** (11); 1,15** (14); 1,24** (16)
	157	15,15 (4) ч	β^-	1,3	0,064 (27); 0,37* (14); 0,413(27)
	158	45,9 (2) мин	β^-	3,4; 2,5	0,080/100/; 0,52**/25/; 0,95**; /95/; 1,19/16/
	159	18,7 (4) мин	β^-	2,6	0,07 (42); 0,09 (18); 0,15 (14); 0,67 (21)
	160	30 (10) с	β^-	3,9	0,075; 0,17; 0,41; 0,52; 0,82
$_{64}$Gd	142	1,5 (3) мин	э. з.	—	0,179
	143	39 (2) с	э. з.	—	0,20; 0,26; 0,46
	144	4,5 (1) мин	β^+	3,3	0,333; 0,347

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	145	23,9 (1) мин	э. з. β^+	— 2,3	0,511 (ан.); 0,80/9/; 1,03/10/; 1,75/100/
	145*m*	85 (3) с	и. п. (95,3), э. з. (4,7)	—	0,749
	146	48,3 (1) сут	э. з., β^+	—	0,078/30/; 0,115**/100/; 0,155/45/
	147	38,1 (1) ч	э. з., β^+	—	0,229/150/; 0,39**/85/; 0,64**/70/; 0,77**/60/; 0,932/60/
	148	93 (6) года	α	3,183 (100)	—
	149	9,4 (3) сут	э. з. (>99) α ($\sim 0{,}001$)	— 3,01	0,150 (48); 0,299 (26); 0,347 (25); 0,750 (11)
	150	1,79 (8) $\times$ $\times 10^6$ лет	α	2,72 (100)	—
	151	120 (20) сут	э. з. α ($\sim 8\cdot10^{-7}$)	— 2,60	0,0216 (3); 0,154 (7); 0,175 (3); 0,244 (7)
	152	1,08 (8) $\times$ $\times 10^{14}$ лет	**0,20 (1)** α	— 2,14	— —
	153	241,6 (2) сут	э. з.	—	0,070 (2,4); 0,099** (55)
	154	Стабилен	**2,18 (3)**	—	—
	155		**14,80 (5)**	—	—
	156		**20,47 (4)**	—	—
	157		**15,65 (3)**	—	—
	158		**24,84 (12)**	—	—
	159	18,56 (8) ч	β^-	0,95	0,058 (3); 0,363 (9)
	160	Стабилен	**21,86 (4)**	—	—
	161	3,7 (1) мин	β^-	1,7; 1,6	0,102 (11); 0,315 (25); 0,361 (66)
	162	9 (1) мин	β^-	1,0	0,40; 0,44
$_{65}$Tb	146	23 (2) с	э. з.	—	1,08; 1,42; 1,58
	147	1,65 (10) ч	э. з., β^+	—	0,305; 0,511 (ан.); 0,694; 1,152
	148	60 (1) мин	э. з., β^+	—	0,511 (ан.); 0,78; 1,12
	149	4,15 (5) ч	э. з. (83) α (~ 17)	— 3,95	0,16; 0,35
	149*m*	4,3 (1) мин	э. з. (>99) α (0,020)	— 3,99	0,796
	150	3,27 (10) ч	э. з. (>99) β^+ α ($\leqslant 0{,}05$)	— 3,6 3,49	0,511/100, ан./; 0,637/100/; 0,93/35/
	151	17,6 (1) ч	э. з. (>99) α (0,009)	— 3,41	0,108 (35); 0,252 (35); 0,288 (32)
	152	17,5 (1) ч	э. з. (80) β^+ (~ 20)	— 2,82	0,344/100/; 0,586/14/; 0,779/14/
	152*m*	4,3 (2) мин	и. п. (78), э. з. (22)	—	0,344; 0,411
	153	2,34 (1) сут	э. з., β^+	—	0,083**(11), 0,11**(12); 0,212 (30)
	154	21,4 (5) ч	э. з., β^+	—	0,123; 0,248; 0,347, 0,53**; 0,65**
	155	5,32 (6) сут	э. з.	—	0,087 (37); 0,105 (25); 0,180 (8)
	156	5,34 (9) сут	э. з.	—	0,089 (17); 0,199 (40); 0,535 (70); 1,22 (29); 1,42 (15)
	156*m*	5,0 (1) ч	и. п.	—	0,088
	157	150 (30) лет	э. з.	—	—
	158	$\sim$ 150 лет	э. з. (82), β^- (18)	—	0,08; 0,94; 0,96
	158*m*	10,5 (2) с	и. п.	—	0,110 (0,5)
	159	Стабилен	**100**	—	—
	160	72,3 (2) сут	β^-	1,74 (0,4); 0,86	0,087 (12); 0,299 (30); 0,879 (31); 0,966** (31); 1,178 (15)
	161	6,91 (2) сут	β^-	0,59 (10); 0,52	0,026 (21); 0,049 (19); 0,075(10)
	162	7,7 (2) мин	β^-	2,4; 1,4	0,180/26/; 0,258/100/; 0,81/44/; 0,89/54/

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	163	19,5 (3) мин	β^-	1,3; 0,8	0,025; 0,235; 0,330; 0,510
	164	3,0 (1) мин	β^-	2,9; 1,7	0,17; 0,69; 0,75
$_{66}$Dy	148	3,1 (1) мин	э. з., β^+	—	0,620
	149	4,6 (4) мин	β^+	—	0,10; 0,79; 1,78; 1,81
	150	7,17 (2) мин	э. з., β^+ α (31)	— 4,23	0,39; 0,511 (ан.)
	151	16,9 (5) мин	β^+ + э. з. (94) α (6)	— 4,06	0,145; 0,511 (ан.); 0,546
	152	2,38 (2) ч	э. з. α (0,09)	— 3,65	0,257
	153	6,4 (1) ч	э. з. α (0,010)	— 3,48	0,08**; 0,25**
	154	$\sim 1 \cdot 10^7$ лет	α	2,85	—
	155	10,0 (3) ч	э. з. β^+ (2)	— 1,08 (0,14); 0,85 (2)	0,227 (68); 0,52** (8); 1,000 (6); 1,16** (6)
	156	$> 1{,}0 \times 10^{18}$ лет	**0,06 (1)**	—	—
	157	8,1 (1) ч	э. з.	—	0,326 (91)
	158	Стабилен	**0,10 (1)**	—	—
	159	144,4 (2) сут	э. з.	—	0,058 (4); 0,348
	160	Стабилен	**2,34 (5)**	—	—
	161	Стабилен	**18,9 (1)**	—	—
	162	Стабилен	**25,5 (2)**	—	—
	163	Стабилен	**24,9 (2)**	—	—
	164	Стабилен	**28,2 (2)**	—	—
	165	2,334 (6) ч	β^-	1,29	0,095 (4); 0,361 (1,1)
	165*m*	1,26 (1) мин	и. п. (97,8) β^- (2,2)	— 1,04 (0,4); 0,89	0,108 (3); 0,514 (1,8)
	166	81,6 (1) ч	β^-	0,48 (5); 0,40	0,082 (12); 0,372 (0,5); 0,426 (0,5)
	167	6,2 мин	β^-	2,0; 1,8	0,25; 0,26; 0,31; 0,57
$_{67}$Ho	150	40 (5) с	э. з.	—	—
	151	47 (2) с	э. з. (90) α (10)	— 4,51	— —
	152	52,3 (5) с	э. з. (94) α (6)	— 4,45	0,614; 0,647
	153	9,3 (5) мин	э. з. α (0,1)	— 3,92	0,109; 0,162; 0,366
	154	11,8 (5) мин	э. з. (> 99) α (0,017)	— 3,93	0,335; 0,511 (ан.); 0,873
	155	48 (1) мин	э. з.	—	0,092; 0,138; 0,511 (ан.)
	156	55,6 (6) мин	β^+	2,9/1/; 1,8/18/	0,138/100/; 0,266/99/; 0,367/23/; 0,511 (ан.)
	157	12,6 (6) мин	β^+	1,5; 1,2	0,087; 0,152; 0,190; 0,227; 0,341; 0,511 (ан.)
	158	11,3 (4) мин	β^+	2,9; 1,3	0,099; 0,218; 0,329; 0,412; 0,52; 0,647; 0,949
	158*m*	27 (2) мин	и. п. (65) э. з. (35)	— —	0,099; 0,218; 0,356; 0,412;
	159	33 (1) мин	э. з., β^+	—	0,057; 0,080; 0,13; 0,253; 0,309
	159*m*	8,30 (8) с	и. п.	—	0,206
	160	25,6 (3) мин	э. з. (> 90) β^+ ($\sim$ 0,4)	— —	0,73; 0,96*
	160*m*	5,02 (5) ч	и. п. (65) э. з. + β^+ (35)	— 1,9	0,060; 0,197 (20); 0,646 (20); 0,729 (50); 0,880 (26); 0,965** (37)
	161	2,48 (5) ч	э. з.	—	0,026 (23); 0,078 (15)
	161*m*	6,7 с	и. п.	—	0,211 (53)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	162	15 (1) мин	э. з. (95) β^+ (5)	— 1,10	} 0,081 (8); 0,511 (9, ан.); 1,319
	162*m*	68 (1) мин	и. п. (61) э. з. (39)	— —	} 0,185 (26); 0,940 (13); 1,224(24)
	163	33 (23) года	э. з.	—	—
	163*m*	1,09 (3) с	и. п.	—	0,299
	164	29 (1) мин	э. з. (58) β^- (42)	— 0,99	} 0,073; 0,091
	164*m*	37,5 (10) мин	и. п.	—	0,037; 0,057
	165	Стабилен	**100**	—	—
	166	26,80 ч	β^-	1,84	0,081 (5,4); 1,380 (0,9)
	166*m*	1,20 (18) × × 10^3 лет	β^-	0,07	0,184 (90); 0,280 (30); 0,711 (58); 0,810 (60)
	167	3,1 (1) ч	β^-	0,96: 0,3	0,06—0,53
	168	3,0 (1) мин	β^-	2,2	0,741; 0,821
	169	4,7 (1) мин	β^-	1,95; 1,2	0,15; 0,68; 0,84; 0,92
	170	42 (3) с	β^-	4,0	0,079; 0,812; 1,894; 1,973
$_{68}$Er	151	23 (2) с	э. з.	—	—
	152	10,1 (2) с	α (~ 90) э. з. (~ 10)	4,80 —	— —
	153	36 (1) с	э. з. (~ 62) α (~ 38)	— 4,67	— —
	154	3,75 (12) мин	α (0,5) э. з. (> 99)	4,15 —	— —
	155	5,3 (3) мин	э. з. (> 99) α (~ 0,02)	— 4,012	} 0,110; 0,242; 0,234
	156	20 мин	э. з.	—	0,030; 0,035
	157	25 (3) мин	э. з., β^+	—	0,117; 0,386; 0,511 (ан.); 1,32
	158	2,25 (7) ч	э. з. β^+	— 0,8	} 0,072; 0,250; 0,315; 0,387; 0,511 (ан.); 0,875
	159	36 (1) мин	э. з., β^+	—	0,37—2.60
	160	28,6 ч	э. з.	—	—
	161	3,24 (4) ч	э. з., β^+	—	0,211 (9); 0,592 (8); 0,826 (63)
	162	Стабилен	**0,14 (1)**	—	—
	163	75,0 (4) мин	э. з. (> 99) β^+ (0,004)	— 0,19	} 0,43 (0,06); 1,10 (0,04)
	164	Стабилен	**1,61 (1)**	—	—
	165	10,36 (4) ч	э. з.	—	—
	166	} Стабилен	**33,6 (2)**	—	—
	167		**22,95 (13)**	—	—
	167*m*	2,28 (3) с	н. п.	—	0,208 (43)
	168	Стабилен	**26,8 (2)**	—	—
	169	9,40 (2) сут	β^-	0,34	0,008 (0,3)
	170	Стабилен	**14,9 (1)**	—	—
	171	7,52 (3) ч	β^-	1,49 (2,3); 1,06	0,112 (25); 0,296 (28); 0,308 (63)
	172	49,3 (5) ч	β^-	0,89 (< 10); 0,37	0,407 (40); 0,610 (40)
	173	1,4 (1) мин	β^-	—	0,193; 0,199; 0,895
$_{69}$Tm	153	1,59 (8) с	α	5,10	—
	154	3,0 (2) с	α	5,04	—
	155	39 (3) с	α	—	—
	156	19 (3) с	α	4,46	—
	157	3,5 (3) мин	э. з.	—	0,110; 0,348; 0,386; 0,455
	158	4,02 (10) мин	э. з.	—	0,192; 0,335; 0,628; 1,150
	159	9,0 (4) мин	э. з., β^+	2,1	0,038; 0,085; 0,220; 0,271; 0,289
	160	9,2 (4) мин	э. з., β^+	—	0,126; 0,264; 0,729
	161	38 (4) мин	э. з., β^+	—	0,084; 0,106; 0,112; 0,172; 1,648
	162	21,7 (2) мин	э. з., β^+	3,7; 2,1	0,102/20/; 0,236/10/; 0,900
	162*m*	24,3 (17) с	и. п. (90), э.з. (10)	—	0,192; 0,812
	163	1,81 (6) ч	э. з., β^+	—	0,104/8/; 0,240**/5/; 1,4

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	164	2,0 (1) мин	э. з. (50) β^+ (50)	— 2,94	0,091 (4); 0,511 (100, ан.); 1,155
	164*m*	5,1 (1) мин	и. п. (80), э. з. (20)	—	0,208; 0,315
	165	30,06 (3) ч	э. з. β^+ (0,007)	— 0,30	0,243 (50); 0,297** (35); 0,807 (15)
	166	7,70 (3) ч	э. з. (98,2) β^+ (~ 2)	— 1,94	0,081; 0,19*; 0,215; 0,46; 0,60**
	167	9,24 (2) сут	э. з.	—	0,057 (4); 0,208 (43); 0,532 (2)
	168	93,1 (1) сут	э. з. (~ 98), β^- (~ 2)	—	0,19** (77); 0,448 (27); 0,73** (40); 0,82** (88)
	169	Стабилен	**100**	—	—
	170	128,6 (3) сут	β^- (> 99) э. з. (0,144)	0,97 —	0,084 (3,3)
	171	1,96 (1) года	β^-	0,097	0,067
	172	63,6 (2) ч	β^-	1,88	0,079 (5); 0,181 (2,2); 1,09 (7); 1,39 (7); 1,46 (7); 1,53 (6)
	173	8,24 (8) ч	β^-	1,3 (2); 0,89	0,399 (89); 0,465 (8)
	174	5,4 (1) мин	β^-	1,2	0,176 (67); 0,273 (85); 0,366 (93); 0,50 (15); 0,99 (89)
	175	15,2 (5) мин	β^-	2,0	0,51; 0,94
	176	1,9 (1) мин	β^-	2,8	0,19; 0,38; 1,07
$_{70}$Yb	154	0,42 (2) с	α	5,33	—
	155	1,65 (15) с	α	5,21	—
	156	24 (1) с	α	4,69	—
	157	38,6 (10) с	α	4,51	0,164; 0,231
	158	1,38 (14) мин	э. з.	—	0,074
	159	1,75 (20) мин	э. з.	—	0,17; 0,18; 0,33; 0,39
	160	4,8 мин	э. з., β^+	—	0,174; 0,216
	161	4,2 (2) мин	э. з., β^+	—	0,078; 0,600; 0,631
	162	18,9 (2) мин	э. з.	—	0,119; 0,163
	163	11,05 (25) мин	э. з., β^+	—	0,064; 0,123; 0,860
	164	75,8 (17) мин	э. з.	—	—
	165	9,9 (3) мин	э. з. β^+	— 1,6	0,080; 0,069; 1,09
	166	56,7 (1) ч	э. з.	—	0,082 (17)
	167	17,5 (2) мин	э. з., β^+	—	0,113** (90); 0,176 (15)
	168	Стабилен	**0,13 (1)**	—	—
	169	32,022 (8) сут	э. з.	—	0,063 (45); 0,177 (22); 0,198 (35)
	169*m*	46 (2) с	и. п.	—	0,024
	170	Стабилен	**3,05 (5)**	—	—
	171		**14,3 (2)**	—	—
	172		**21,9 (3)**	—	—
	173		**16,12 (18)**	—	—
	174		**31,8 (4)**	—	—
	175	4,19 (1) сут	β^-	0,466	0,114 (1,9); 0,283 (3,7); 0,396 (6,0)
	176	Стабилен	**12,7 (1)**	—	—
	176*m*	11,4 (5) с	и. п.	—	0,19; 0,29; 0,39
	177	1,9 (1) ч	β^-	1,40	0,122 (3); 0,151 (16), 1,080 (5); 1,241 (3)
	177*m*	6,41 (2) с	и. п.	—	0,104 (65); 0,228 (13)
	178	74 (3) мин	β^-	0.6	0,348; 0,391
$_{71}$Lu	155	0,07 (2) с	α	5,63	—
	156	0,23 (3) с	α	5,54	—
	157	5,5 (3) с	α	4,996	—
	164	3,1 мин	β^+	—	0,124; 0,262; 0,740
	165	12 (1) мин	э. з., β^+	—	0,121; 0,132; 0,174; 0,204
	166	2,65 (10) мин	э. з., β^+	—	0,102; 0,228; 0,338
	166*m*$_1$	1,41 (10) мин	э. з. (58), и. п. (42)	— —	0,034; 0,102; 0,228; 0,285

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	$166m_2$	2,12 (10) мин	э. з. (> 80)	—	1,26; 1,43; 2,10
	167	51,5 (10) мин	э. з.	—	0,030; 0,278; 0,372; 0,402;
			β^+ (~ 1)	1,5	0,511 (ан.); 1,267
	168	5,3 (2) мин	э. з.	—	
			β^+ (~ 12)	1,2	0,087 (7); 0,90 (10); 0,99 (13);
	$168m$	6,7 (4) мин	э. з., β^+	—	0,198; 0,89*; 0,979
	169	34,06 (5) ч	э. з.	—	
			β^+	1,2	0,063; 0,111; 0,191; 0,577
	$169m$	160 (10) с	и. п.	—	0,029
	170	2,00 (3) сут	э. з.	—	
			β^+	2,4	0,084 (13); 0,98; 1,28; 2,04
	$170m$	0,7 с	и. п.	—	—
	171	8,22 (3) сут	э. з.	—	
			β^+ (~ 0,01)	—	0,019 (20); 0,668 (14); 0,741(68)
	$171m$	79 (2) с	и. п.	—	0,071 (0,2)
	172	6,70 (3) сут	э. з.	—	0,182 (26); 0,81 (21);
				—	0,90** (45); 1,09 (60)
	$172m$	3,7 мин	и. п.	—	—
	173	1,37 (1) года	э. з.	—	0,079 (14); 0,101 (7); 0,272 (18)
	174	3,31 (5) года	э. з., β^+	—	0,076 (6); 1,24 (9)
	$174m$	142 (2) сут	и. п. (99,3),	—	
			э. з. (0,7)		0,067; 0,176; 0,273; 0,994
	175	Стабилен	**97,41 (2)**	—	—
	176	3,60 (16) ×	β^-	0,6	0,088 (15); 0,202 (85); 0,306 (95)
		× 10^{10} лет		—	
			2,59 (2)	—	—
	$176m$	3,68 (1) ч	β^-	1,31	0,088; 0,126
	177	6,71 (1) сут	β^-	0,497	0,113 (2,8); 0,208 (6,1)
	$177m$	160,9 (3) сут	β^- (78)	0,2	0,113 (23); 0,208 (62);
			и. п. (22)	—	0,228 (37); 0,378 (29);
					0,418 (21)
	178	28,4 (2) мин	β^-	2,0	0,089; 0,214; 0,326; 0,427
	$178m$	22,7 (4) мин	β^-	1,2	0,332
	179	4,59 (6) ч	β^-	1,35	0,213
	180	5,7 (1) мин	β^-	2,7; 1,5	0,22; 0,41; 1,11; 1,20
$_{72}$Hf	157	0,110 (6) с	α	5,735	—
	158	2,9 (2) с	α	5,27	—
	159	5,6 (5) с	α	5,095	—
	161	17 (2) с	α	4,60	—
	166	6,77 (30) мин	э. з., β^+	—	0,079; 0,342; 0,408
	167	2,05 (5) мин	э. з., β^+	—	0,315
	168	25,9 мин	э. з.	—	
			β^+ (~ 2)	1,7	0,129; 0,17
	169	3,24 (4) мин	э. з.	—	0,115; 0,370; 0,493
	170	16,01 (13) ч	э. з.	—	0,120; 0,165; 0,99; 1,28;
					2,03; 2,36; 2,52; 2,94
	171	12,1 (4) ч	э. з.	—	0,122; 0,188; 0,29; 0,34; 0,47;
					0,66; 0,86; 1,07
	172	1,87 (3) года	э. з.	—	0,024 (22); 0,082 (10),
					0,125** (21)
	173	24,0 (5) ч	э. з.	—	0,13** (96); 0,30** (52)
	174	2,0 (4) ×	α	2,50	—
		× 10^{15} лет			
			0,162 (2)	—	—
	175	70 (2) сут	э. з.	—	
	176	Стабилен	**5,206 (4)**	—	0,089 (3,4); 0,343 (85)
	177		**18,606 (3)**	—	—
	$177m_1$	1,08 (6) с	и. п.	—	—
					0,113 (30); 0,208 (81);
	$177m_2$	51,4 (5) мин	и. п.	—	0,228 (48); 0,378 (37)
	178	Стабилен	**27,297 (3)**	—	0,277; 0,295; 0,327
					—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	$178m_1$	4,0 с	и. п.	—	0,089; 0,213; 0,326; 0,426
	$178m_2$	31 (1) год	и. п.	—	0,217; 0,495; 0,574
	179	Стабилен	**13,629 (5)**	—	—
	$179m_1$	18,68 (6) с	и. п.	—	0,217 (94)
	$179m_2$	25,1 (3) сут	и. п.	—	0,12; 0,15; 0,36; 0,45
	180	Стабилен	**35,100 (6)**	—	—
	$180m$	5,5 (1) ч	и. п.	—	0,058 (48); 0,215 (82); 0,333 (93); 0,444 (80)
	181	42,4 (1) сут	β^-	0,41	0,133** (48); 0,346 (13); 0,482 (81)
	182	$9\ (3)\cdot10^6$ лет	β^-	0,2	0,271 (84)
	$182m$	61,5 (15) мин	β^- (54), и. п. (46)	—	0,224; 0,344; 0,943
	183	64 (1) мин	β^-	1,5: 1,2	0,46/58/; 0,82/100/
	184	4,12 (5) ч	β^-	1,1	0,14; 0,18; 0,34
$_{73}$Ta	167	2,9 (15) мин	э. з.	—	—
	168	2,5 (12) мин	β^+	—	0,124; 0,262; 0,750
	169	4,9 (4) мин	э. з., β^+	—	0,029; 0,154; 0,192
	170	6,76 (6) мин	э. з., β^+	—	0,10; 0,22; 0,86; 0,99
	171	23,3 (3) мин	э. з.	—	0,05; 0,17; 0,50*
	172	36,8 (3) мин		—	0,092; 0,208; 0,511 (ан.); 1,109
			э. з., β^+	—	0,090**; 0,170**; 0,64; 1,00
	173	3,65 (5) ч	э. з., β^+	—	0,091; 0,125; 0,160; 0,205; 0,280; 0,350; 0,511 (ан.)
	174	1,2 (1) ч	э. з., β^+	—	0,08; 0,13; 0,21; 0,27; 0,35; 0,45; 0,60; 0,83; 1,2; 1,4; 1,7
	175	10,5 (2) ч	э. з.	—	0,088; 0,202
	176	8,08 (7) ч	э. з., β^+	—	0,113 (6); 0,208 (1)
	177	56,6 (1) ч	э. з., β^+	—	0,093/100/; 0,511/10, ан./; 1,10/11/; 1,35**/46/
	178	9,31 (3) мин	э. з. (99)	—	
			β^+ (1)	0,89	
	179	664,9 (42) сут	э. з.	—	—
	180	$>1{,}0\cdot10^{13}$ лет	**0,012 (2)**	—	—
	$180m$	8,1 (1) ч	э. з. (87)	—	0,093 (4); 0,103 (0,6)
			β^- (13)	1,71	
	181	Стабилен	**99,988 (2)**	—	—
	182	115,0 (2) сут	β^-	0,71 (0,3); 0,522	0,068 (42); 1,121 (34); 1.221(27)
	$182m_1$	0,28 с	и. п.	—	—
	$182m_2$	15,84 (10) мин	и. п.	—	0,147 (40); 0,172 (40); 0,184(20)
	183	5.1 (1) сут	β^-	0,80; 0,62	0,108 (11); 0,161** (17); 0,246** (33); 0,292 (11); 0,354 (11)
	184	8,7 (1) ч	β^-	2,64 (0,2); 1,76 (0,9); 1,19	0,111 (21); 0,25 (42); 0,30 (24); 0,41 (71); 0,90** (49)
	185	49 (2) мин	β^-	1,7	0,175 (60)
	186	10,5 (5) мин	β^-	2,6; 2,2	0,20 (74); 0,51 (33); 0,61 (33); 0,73 (48)
$_{74}$W	162	$<0{,}25$ с	α	5,538	—
	163	2,5 (3) с	α	5,384	—
	164	6,3 (5) с	α	5,146	—
	165	5,1 с	α	4,909	—
	166	16 с	α	4,739	—
	170	4 (1) мин	э. з.	—	—
	171	9,0 (15) мин	э. з.	—	—
	172	6,7 (10) мин	э. з.	—	0,036; 0,458; 0,624
	173	16,5 (5) мин	э. з.	—	0,050; 0,071; 0,106; 0,365
	174	29 мин	э. з.	—	0,035; 0,329; 0,429
	175	34 (1) мин	э. з.	—	0,26; 0,80; 1,3; 1,6
	176	2,3 (1) ч	э. з. (>99)	—	0,034; 0,100
			β^+ ($\sim0{,}5$)	—	
	177	135 (3) мин	э. з.	—	0,20; 0,42; 0,62; 0,83; 1,00

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	178	21,7 (3) сут	э. з.	—	—
	179	37,5 (5) мин	э. з.	—	0,031 (22)
	179*m*	6,7 (3) мин	и. п. (> 99),	—	0,222
			э. з. (0,31)	—	
	180	$6 \cdot 10^{14}$ лет	**0,13 (3)**	—	—
	181	121,2 (3) сут	э. з.	—	0,006 (1); 0,136 (0,1); 0,152 (0,1)
	182	Стабилен	**26,3 (2)**	—	—
	183	Стабилен	**14,3 (1)**	—	—
	184	$> 3 \cdot 10^{17}$ лет	**30,67 (15)**	—	—
	185	75,1 (3) сут	β^-	0,429	—
	185*m*	1,67 (3) мин	и. п.	—	0,100/16/; 0,13/70/; 0,17/100/
	186	Стабилен	**28,6 (2)**	—	—
	187	23,9 (1) ч	β^-	1,31 (15); 0,63	0,479 (23); 0,686 (27)
	188	69,4 (5) сут	β^-	0,349	0,227 (0,22); 0,290 (0,40)
	189	11,5 (3) мин	β^-	2,5; 2,0	0,258/100/; 0,417/96/
	190	30,0 (15) мин	β^-	1,0	0,158; 0,162
$_{75}$Re	170	~ 7 с	β^+	—	0,156; 0,306; 0,413
	172	48 (12) с	э. з.	—	0,123; 0,254; 0,743
	175	5 (1) мин	э. з.	—	0,185
	176	5,7 (8) мин	э. з.	—	0,109; 0,241
	177	14,0 (10) мин	э. з.	—	0,080*; 0,096; 0,197
	178	13,2 (2) мин	э. з.	—	0,106; 0,237; 0,939
	179	19,7 (5) мин	э. з., β^+	—	0,29; 0,43; 1,68
	180	2,43 (6) мин	э. з.	—	0,11; 0,511 (ан.); 0,88; 0,90
			β^+	1,8	
	181	20 (1) ч	э. з.	—	0,365; 0,639
	182	64 (5) ч	э. з.	—	0,068; 0,100; 1,122; 1,189; 1,23**; 2,0; 2,01
	183	70,0 (11) сут	э. з.	—	0,046; 0,053; 0,109**; 0,209; 0,246; 0,292
	184	38,0 (5) сут	э. з.	—	0,111; 0,78**; 0,90**
	184*m*	165 (5) сут	э. з. (25), и. п. (75)	—	0,22; 0,25; 0,92
	185	Стабилен	**37,40 (2)**	—	—
	186	90,64 (9) ч	β^- (92,2)	1,07	0,137 (9); 0,632 (0,03); 0,768 (0,035)
			э. з. (7,8)	—	
	186*m*	$2,0 \cdot 10^5$ лет	и. п.	—	0,040; 0,059; 0,099
	187	$5\ (2) \cdot 10^{10}$ лет	β^-	0,003	—
			62,60 (2)	—	—
	188	16,98 (2) ч	β^-	2,12	0,155 (10); 0,478 (0,6); 0,633 (0,9)
	188*m*	18,6 (1) мин	и. п.	—	0,092 (5); 0,106 (10)
	189	24,3 (4) ч	β^-	1,00	0,150* (4); 0,187* (3); 0,218* (10); 0,245 (4)
	190	3,1 (3) мин	β^-	1,8	0,191/10/; 0,392/10/; 0,57/10/; 0,83/3/
	190*m*	3.2 (2) ч	β^- (51).и. п. (~49)	—	0,187; 0,558; 0,569
	191	9,8 мин	β^-	1,8	—
	192	16 (1) с	β^-	2,5	0,20; 0,29; 0,37; 0,48; 0,57
$_{76}$Os	169	3,2 (2) с	α	5,57	—
	170	7,1 (5) с	α	5,40	—
	171	8,2 (8) с	α	5,24	—
	172	19 (2) с	э. з. (> 99), α (⩽0,3)	5,11	—
	173	16 (5) с	э. з. (99,98), α (0,02)	4,94	—
				4,76	0,118; 0,325
	174	45 (5) с	э. з. (99,98), α (0,02)		

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность,%)	
				групп частиц	γ-излучения
	175	1,4 (1) мин	э. з.	—	0,125; 0,181
	176	3,0 (7) мин	э. з.	—	0,776; 1,209; 1,291
	177	3,5 (8) мин	э. з.	—	0,085; 0,196
	178	5,0 (4) мин	э. з.	—	—
	179	6,5 (5) мин	э. з.	—	0,06; 0,22; 0,60; 0,97; 1,33
	180	22 (3) мин	э. з.	—	0,02
	181	2,7 (1) мин	э. з., β^+	—	0,118; 0,145
	182	22 (2) ч	э. з.	—	0,180/7/; 0,510/10/
	183	13,0 (5) ч	э. з., β^+	—	0,114 (27); 0,382 (90)
	183*m*	9,9 (3) ч	э. з. (89), и. п. (11)	—	0,171; 1,035 (6); 1,105** (48)
	184	$> 1 \cdot 10^{17}$ лет	**0,02 (1)**	—	—
	185	93,6 (5) сут	э. з.	—	0,646 (80); 0,875** (11)
	186	2 (1)·10^{15} лет	**1,58 (10)**	—	—
			α	2,76	—
	187		**1,6 (1)**	—	—
	188	Стабилен	**13,3 (2)**	—	—
	189		**16,1 (3)**	—	—
	189*m*	4,8 (1) ч	и. п.	—	0,031
	190	Стабилен	**26,4 (4)**	—	—
	190*m*	9,9 (1) мин	н. п.	—	0,187 (70); 0,361 (94); 0,502 (98); 0,616 (99)
	191	15,4 (1) сут	β^-	0,143	0,129 (25)
	191*m*	13,10 (5) ч	и. п.	—	0,074
	192	Стабилен	**41,0 (3)**	—	—
	192*m*	5,9 (1) с	и. п.	—	0,20; 0,30; 0,45; **0,48**; **0,57**
	193	30,5 (4) ч	β^-	1,13	0,139 (3); 0,28** (2,1); 0,460 (3,9); 0,558 (2,1)
	194	6,0 (2) лет	β^-	0,053	0,043 (10); 0,078 (0,03)
	195	6,5 мин	β^-	2	—
	196	34,9 (2) мин	β^-	0,8	0,126; 0,408
$_{77}$Ir	169	0,4 (1) с	α	6,11	—
	171	1,0 (3) с	α	5,91	—
	172	1,7 (5) с	α	5,81	—
	173	3,0 (1) с	α	5,67	—
	174	4 (1) с	α	5,48	—
	175	4,5 (10) с	α	5,39	—
	176	8 (1) с	α	5,12	—
	177	21 (2) с	α	5,01	—
	178	22 (2) с	э. з.	—	0,132; 0,266; 0,363
	179	4 (1) мин	э. з.	—	—
	180	1,5 (1) мин	э. з.	—	0,132; 0,276
	181	5 (3) мин	э. з.	—	0,05; 0,11; 0,23; 0,32; 1,64
	182	15 (1) мин	э. з.	—	0,133; 0,278; 0,510; 0,912
	183	57 (4) мин	э. з.	—	0,24*
	184	3,02 (6) ч	э. з.	—	0,125/100/; 0,267/200/; 0,392/90/
	185	14 (9) ч	э. з.	—	0,101; 0,254; 1,67; 1,83
	186	15,8 (3) ч	э. з. (97)	—	0,137 (45); 0,297 (74); 0,434(35)
			β^+ (3)	1,94	
	187	10,5 (3) ч	э. з.	—	0,18/45/; 0,41/100/; 0,61/45/; 0,98/50/
	188	41,5 (5) ч	э. з. (> 99)	—	0,155 (34); 0,633* (29)
			β^+ (~ 0,3)	1,66	
	189	13,2 (1) сут	э. з.	—	0,245 (18)
	190	11,78 (10) сут	э. з.	—	0,187 (51); 0,37** (39); 0,40** (39); 0,518 (39); 0,56** (72); 0,604 (47)
	190m_1	1,2 ч	и. п.	—	0,026
	190m_2	3,2 (2) ч	э. з. (95), и. п. (5)	—	0,175
	191	Стабилен	**37,3 (5)**	—	—
	191*m*	4,94 (3) с	и. п.	—	0,129; 0,171

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	192	73,831 (8) сут	β^- (95,4) э. з. (4,6)	0,67 —	0,296 (29); 0,308 (30), 0,317 (81); 0,468 (49)
	$192m_1$	1,45 (5) мин	и. п. (> 99) β^- (0,017)	— 1,5	0,058 (0,005); 0,317 (0,008); 0,612 (0,003)
	$192m_2$	241 (9) год	и. п.	—	0,155
	193	Стабилен	**62,7 (5)**	—	—
	$193m$	10,60 (11) сут	и. п.	—	0,080
	194	19,15 (3) ч	β^-	2,24	0,328 (10); 0,64* (1)
	$194m$	171 (11) сут	β^-	2,3	0,13; 0,32; 0,63
	195	2,5 (3) ч	β^-	1,1	0,099; 0,211
	$195m$	3,8 (2) ч	β^-	1,0	0,10; 0,13; 0,33; 0,37; 0,43; 0,66
	196	52 (2) с	β^-	3,2	0,33; 0,36; 0,45; 0,78
	$196m$	1,40 (2) ч	β^-	1,2	0,356 (94); 0,39 (95); 0,44 (95); 0,522 (99); 0,65 (100)
	197	5,8 (5) мин	β^-	2,0	0,50
	198	8 (1) с	β^-	3,6	0,407; 0,507
$_{78}$Pt	174	0,7 (2) с	α (~ 80) э. з. + β^+ (20)	6,043 —	— —
	175	2,1 (2) с	α (~ 75)	5,964	0,076
	176	6,33 (15) с	α (42) э. з. + β^+ (58)	5,744 —	— —
	177	11 (2) с	α (9) э. з. + β^+ (91)	5,527; 5,435 —	— —
	178	21,0 (7) с	α (7) э. з. + β^+ (93)	5,458; 5,30 —	— —
	179	33 (4) с	α (0,27) э. з. + β^+ (> 99)	5,15 —	— —
	180	52 (3) с	α (~ 0,3) э. з. + β^+ (> 99)	5,14 —	— —
	181	51 (5) с	α (~ 0,06) э. з. + β^+ (> 99)	5,02 —	— —
	182	2,6 (1) мин	э. з. (> 99) α (~ 0,02)	— 4,84	0,136; 0,146; 0,210
	183	6,6 (9) мин	э. з. (> 99) α (~ 0,0013)	— 4,73	0,119; 0,265*; 0,307
	184	17,3 (2) мин	э. з. (> 99) α (~ 0,001)	— 4,50	0,155; 0,192; 0,548; 0,731
	185	70,9 (24) мин	э. з.	—	0,035; 0,63; 1,56
	186	2,0 (1) ч	э. з. (> 99) α ($4 \cdot 10^{-4}$)	— 4,23	0,67*
	187	2,35 (3) ч	э. з.	—	0,106; 0,202; 0,285; 0,709
	188	10,2 (3) сут	э. з. (> 99) α ($3 \cdot 10^{-5}$)	— 3,93	0,140/22/; 0,19**/100/; 0,38/15/
	189	10,89 (11) ч	э. з.	—	0,094/120/; 0,141/124/; 0,187/137/; 0,243/100/; 0,56**/230/; 0,61**/180/; 0,722/156/
	190	$6\ (1) \cdot 10^{11}$ лет	α **0,01 (1)**	3,18 —	— —
	191	2,9 (1) сут	э. з.	—	0,36** (5); 0,410 (3); 0,539 (9)
	192	Стабилен	**0,79 (5)**	—	—
	193	50 (9) лет	э. з.	—	—
	$193m$	4,33 (3) сут	и. п.	—	0,150
	194	Стабилен	**32,9 (5)**	—	—
	195	Стабилен	**33,8 (5)**	—	—
	$195m$	4,02 (1) сут	и. п.	—	0,099 (11); 0,129 (1)
	196	Стабилен	**25,3 (5)**	—	—
	197	18,3 (3) ч	β^-	0,670	0,077 (20); 0,191 (6)
	$197m$	94,4 (8) мин	и. п. (97) β^- (3)	— 0,737	0,279 (2,6); 0,346 (13)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	198	Стабилен	7,2 (2)	—	—
	199	30,8 (4) мин	β^-	1,69	0,197 (9); 0,32* (8); 0,475*(12); 0,540 (24)
	199*m*	13,6 (4) с	и. п.	—	0,032; 0,392
	200	12,5 (3) ч	β^-	0,7; 0.6	0,08; 0,14; 0,23; 0,24
	201	2,5 (1) мин	β^-	2,66	0.15; 0,23; 1,76
$_{79}$Au	176	1,25 (30) с	α	6,29; 6,26	—
	177	1,3 (4) с	α	6,15; 6.12	—
	178	2,6 (5) с	α	5,92	—
	179	7,5 (4) с	α	5,84	—
	181	11,3 (7) с	α (1,1)	5,60; 5,47	—
	182	21 (2) с	э. з. (> 99), α (~ 0,04)	5,35	0,155; 0,265; 0.787; 0,855
	183	44 (2) с	α (0.3)	5,34	0,312
	184	53,0 (14) с	э. з. (> 99), α (0,022)	5,17; 5,11	0,163; 0,273; 0,363
	185	4,3 (1) мин	э з. (> 99), α (0,09)	5,07	0,243; 0,310; 0,332
	186	10,7 (5) мин	э. з.	—	0,16; 0,22; 0,30; 0,40; 0,76
	187	8,0 (4) мин	э. з. α	— 4,69	} 0,92; 1,33; 1,41
	188	8,84 (6) мин	э. з., β^+	—	0,25; 0,33; 0,63
	189	28,7 (3) мин	э. з.	—	0,35; 0,45; 0,71; 0,81
	189*m*	4,55 (10) мин	э. з., β^+	—	0,17; 0,32
	190	42,8 (10) мин	э. з., β^+	—	0,29**/100/; 0,60**/5/
	191	3,18 (8) ч	э. з., β^+	—	0,14/10/; 0,30/60/; 0,60/10/
	191*m*	0,92 (11) с	и. п.	—	0,267
	192	4,94 (9) ч	э. з. β^+ (~ 1)	— 2,5	} 0,137; 0,158; 0,296; 0,308; 0,317; 0,612
	193	17,65 (15) ч	э. з., β^+	—	0,114** (5); 0,18** (11); 0,26* (9)
	193*m*	3.9 (3) с	и. п. (> 99), э. з. (0,03)	—	0,258 (65)
	194	39,5 (5) ч	э. з. (~ 97) β^+ (~ 3)	— 1,49	} 0,294 (12); 0,328 (68); 1,469
	195	183 (2) сут	э. з.	—	0,099 (10); 0,129 (1)
	195*m*	30,5 (2) с	и. п.	—	0,261 (77)
	196	6,183 (10) сут	э. з. (93) β^- (7)	— 0,26	} 0,333 (25); 0,356 (94); 0,426 (6)
	196m_1	8,1 (2) с	и. п.	—	0,085
	196m_2	9,7 (1) ч	и. п.	—	0,148 (42); 0,188 (32)
	197	Стабилен	100	—	—
	197*m*	7,8 (1) с	и. п.	—	0,130 (8); 0,279 (75)
	198	2.696 (2) сут	β^-	0,962	0,412 (95); 0,676 (1)
	198*m*	2,30 (4) сут	и. п.	—	0,097; 0,180; 0,204; 0,215
	199	3,139 (7) сут	β^-	0,46; 0,30	0,158 (37); 0,208 (8)
	200	48,4 (3) мин	β^-	2,2	0,368 (24); 1.227 (23)
	200*m*	18,7 (5) ч	β^- (~ 84), и. п. (~ 16)	0,6	0,256; 0,368; 0,498; 0,579
	201	26 (1) мин	β^-	1,3	0,53; 0,61
	202	28 (2) с	β^-	3,5	0,44; 1,12; 1,20; 1,31
	203	53 (2) с	β^-	1,9	0,69
	204	40 (3) с	β^-	—	0,44; 1,51
$_{80}$Hg	178	0,47 (14) с	α (~ 84), э. з. (~ 16)	6,43	—
	179	1,09 (4) с	α (~ 53), э. з. (~ 47)	6,288	—
	180	2,9 с	α	6,120	0,301; 0.381
	181	3,6 (3) с	э. з. (74), α (26)	6,006; 5,94; 5,92	0,147
	182	11,2 (10) с	э. з. (91), α (9)	5,87; 5,70	0,129; 0,217; 0,413
	183	8,8 (5) с	э. з. (88), α (12)	5,905	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	184	30,6 (3) с	э. з. (98,7), α (1,3)	5,54	0,156; 0,236; 0,295
	185	50 (2) с	э. з (⩽ 95)	—	0,222; 0,258
			α (⩾ 5)	5,64	
	186	1,38 (10) мин	э. з. (> 99), α (0,016)	5,09	0,125; 0,27; 0,35; 0,44
	187	3 мин	э. з., α	—	0,175; 0,255; 0,40
	188	3,25 (15) мин	э. з.	—	0,115; 0,191
			α	4,61	
	189	7,6 (1) мин	э. з., β^+	—	0,165; 0,24; 0,32; 0,50
	190	20,0 (5) мин	э. з.	—	0,14**; 0,17
	191	49 (10) мин	э. з.	—	0,26**
	191*m*	50,8 (15) мин	э. з.	—	—
	192	4,85 (20) ч	э. з., β^+ (< 1)		0,114 /30/, 0,157/20/; 0,274/100/
				—	
	193	3.80 (15) ч	э. з.	—	0,187; 0,574; 0,762; 0,855; 1,04; 1,08
	193*m*	11,8 (2) ч	э. з. (92), и. п. (8)	—	0,141; 0,218; 0,258; 0,574
	194	260 (40) лет	э. з.	—	—
	195	9,9 (5) ч	э. з.	—	0,20**; 0,261; 0,59*; 0,780; 0,930; 1,110; 1,172
	195*m*	41,6 (8) ч	э. з. (50), и. п. (50)	—	0,200 (35); 0,261 (20); 0,560(20)
	196	Стабилен	**0,14 (10)**	—	—
	197	64,14 (5) ч	э. з.	—	0,077 (18); 0,191 (2)
	197*m*	23,8 (1) ч	и. п. (93), э. з. (7)	—	0,134 (42); 0,279 (7)
	198	Стабилен	**10,02 (7)**	—	—
	199		**16,84 (11)**	—	—
	199*m*	42,6 (2) мин	и. п.	—	0,158 (53); 0,375 (15)
	200	Стабилен	**23,13 (11)**	—	—
	201		**13,22 (11)**	—	—
	202		**29,80 (14)**	—	—
	203	46,60 (2) сут	β^-	0,214	0,279 (81,5)
	204	Стабилен	**6,85 (5)**	—	—
	205	5,2 (1) мин	β^-	1,7	0,205
	206	8,15 (10) мин	β^-	1,3	0,31; 0,65
$_{81}$Tl	184	11 (1) с	э. з. (98), α (2)	**6,16**; 5,99	0,287; 0,340; 0,367
	185*m*	1,8 (2) с	α, и. п.	**5,97**	—
	186	45 (3) с	э. з. (> 99), α ∼ (0,006)	**5,77**; 5,65	0,36; 0,40
	186*m*	3 с	и. п.	—	—
	187	∼ 51 с	э. з.	—	0,127; 0,350
	187*m*	15,60 (12) с	и. п., α	5,53	0,16*; 0,25
	188	71 (10) с	э. з., β^+	—	0,413
	189	2,3 (2) мин	э. з.	—	0,334; 0,942
	190	3,7 (3) мин	э. з., β^+	—	0,416; 0,625; 0,731
	191	5,22 (16) мин	э. з., β^+	—	0,22; 0,33*; 0,511 (ан.)
	192	9,6 (4) мин	э. з., β^+	—	0,424
	193	21,6 (8) мин	э. з., β^+	—	0,158; 0,169; 0,178; 0,187; 0,208; 0,216; 0,247; 0,511 (ан.)
	193*m*	2,11 (15) мин	э. з., и. п.	—	0,208; 0,345; 0,586
	194	33,0 (5) мин	э. з.	—	0,427
	194*m*	32,8 (2) мин	э. з.	—	0,097; 0,427; 0,636; 0,749
	195	1,16 (5) ч	э. з.	—	0,564; 0,885; 1,364
			β^+	1,38	
	195*m*	3,6 (4) с	и. п.	—	0,383 (95)
	196	1,84 (3) ч	э. з., β^+	—	0,426; 0,611; 0,635
	196*m*	1,41 (2) ч	э. з. (96,2), и. п. (3,8)	—	0,426; 0,635; 0,695
	197	2,84 (4) ч	э. з., β^+	—	0,152; 0,426
	197*m*	0,54 (1) с	и. п.	—	0,222 (40); 0,385 (90)
	198	5,3 (5) ч	э. з.	—	0,412 (90); 0,65** (40);
			β^+ (∼ 0,7)	2,4	1,20 (21); 1,42 (24)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	198*m*	1,87 (3) ч	э. з. (56), и. п. (44)	—	0,283 (30); 0,412 (45); 0,586 (35); 0,635 (35)
	199	7,42 (8) ч	э. з.	—	0,158 (5); 0,208 (12); 0,247 (9); 0,455 (14)
	200	26,1 (1) ч	э. з.	—	
			β^+ (0,37)	1,44 (0,06); 1,07 (0,3)	0,368 (88); 0,579 (10); 1,21** (35)
	201	73,1 (2) ч	э. з.	—	0,135 (2); 0,167 (8)
	202	12,23 (2) сут	э. з.	—	0,439 (95); 0,522 (0,1)
	203	Стабилен	**29,524 (9)**	—	—
	204	3,78 (2) года	β^- (97,4)	0,766	—
			э. з. (2,6)	—	—
	205	Стабилен	**70,476 (9)**	—	—
	206	4,20 (2) мин	β^-	1,52	—
	206*m*	3,76 (4) мин	и. п.	—	0,216; 0,266; 0,453; 1,021
	207	4,77 (2) мин	β^-	1,44	0,897 (0,16)
	207*m*	1,33 (11) с	и. п.	—	0,35; 1,00
	208	3,07 (2) мин	β^-	2,4; 1,80	0,583 (86); 2,614 (100)
	209	2,20 (7) мин	β^-	1,99	0,45 (100); 1,56 (100)
	210	1,30 (3) мин	β^-	2,3	0,296 (80); 0,795 (100)
$_{82}$Pb	185	4,1 (3) с	α	6,48; 6,40	—
	186	7,9 (16) с	α	6,32	—
	187	17,5 (36) с	α	6,08	0,34*; 0,39
	188	24,5 (15) с	э. з. (97), α (3)	5,98	0,185; 0,758
	189	51 (3) с	э. з. (> 99), α (~ 0,4)	5,72	0,27—1,11
	190	1,2 (1) мин	э. з. (> 99), α (0,2)	5,577	0,14; 0,94
	191	1,33 (8) мин	э. з. (> 99), α (0,013)	5,29	0,937
	192	3,5 (1) мин	э. з. (> 99), α (0,007)	5,06	0,17; 0,61; 1,20
	193	5,8 (2) мин	э. з.	—	0,39; 0,72; 0,94
	194	11 (2) мин	э. з.	—	0,204
	195	15,8 (2) мин	э. з.	—	0,39*; 0,71; 0,88
	196	37 (3) мин	э. з.	—	0,192; 0,240; 0,253; 0,367; 0,503
	197	10 (2) мин	э. з.	—	0,375; 0,386; 0,894
	197*m*	44,6 (9) мин	э. з. (81), и. п. (19)	—	0,085; 0,222; 0,234; 0,386*
	198	2,40 (10) ч	э. з.	—	0,173 (28); 0,290 (16); 0,38**(40)
	199	90 (10) мин	э. з.	—	
			β^+	2,8	0,353 (17); 0,367 (80)
	199*m*	12,2 (3) мин	и. п. (93), э. з. (7)	—	0,424 (20)
	200	21,5 (4) ч	э. з.	—	0,109; 0,146*; 0,236; 0,26**; 0,290*; 0,450
	201	9,4 (2) ч	э. з.	—	0,330; 0,361; 0,406; 0,585;
			β^+	0,55	0,766; 0,907; 0,946
	201*m*	61 с	и. п.	—	0,629 (51)
	202	~ $3 \cdot 10^5$ лет	э. з.	—	—
	202*m*	3,62 (3) ч	и. п. (90,5), э. з. (9,5)	—	0,422 (90); 0,658 (35); 0,787 (45); 0,961 (90)
	203	52,1 (2) ч	э. з.	—	0,279 (81); 0,401 (5)
	$203m_1$	6,3 (2) с	и. п.	—	0,825 (70)
	$203m_2$	0,48 (2) с	и. п.	—	—
	204	> $1,4 \cdot 10^{17}$ лет	**1,4 (1)**	—	—
	204*m*	67,2 (3) мин	и. п.	—	0,375 (93); 0,90* (189)
	205	1,43 (14) × × 10^7 лет	э. з.	—	—
	206	Стабилен	**24,1 (1)**	—	—
	207		**22,1 (1)**	—	—
	207*m*	0,805 (10) с	и. п.	—	0,570 (98); 1,064 (83)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	208	Стабилен	**52,4 (1)**	—	—
	209	3,253 (14) ч	β^-	0,635	—
	210	22,3 (2) года	β^- ($>$ 99) α ($1{,}7\cdot10^{-6}$)	0,061 3,72	0,047 (4)
	211	36,1 (2) мин	β^-	1,36	0,405 (3,4); 0,427 (1,8); 0,832 (3,4)
	212	10,64 (1) ч	β^-	0,58	0,239 (47); 0,300 (3,2)
	213	10,2 (3) мин	β^-	—	—
	214	26,8 мин	β^-	1,03 (6); 0,67	0,242 (4); 0,295 (19); 0,352 (36)
$_{83}$Bi	189	$<$ 1,5 с	α	6,67	—
	190	5,4 (5) с	α ($\sim$ 90)	6,45	—
	191	13 (1) с	α ($\sim$ 40)	6,32	—
	192	42 (5) с	α ($\sim$ 20)	6,06	—
	193	64 (4) с	α ($\sim$ 60	5,90	—
	193*m*	3,5 с	α ($\sim$ 25)	6,48	—
	194	105 (15) с	э. з. ($>$ 99) α ($<$ 0,2)	— 5,61	0,280; 0,575; 0,965
	195	170 (20) с	α ($<$ 0,2)	5,43	—
	195*m*	90 (5) с	α (4)	6,11	—
	196	4,6 (5) мин	э. з.	—	0,372; 0,688; 1,049
	197 (*m*)	9,5 (10) мин	α (0,11), э. з. ($>$99)	5,77	—
	198	11,85 (18) мин	э. з.	—	0,20; 0,32; 0,56; 1,06
	198*m*	7,7 (5) с	и. п.	—	0,248
	199	27 (1) мин	э. з. ($>$ 99) α ($\sim$ 0,01)	— 5,53	0,425; 0,837; 0,842; 0,946
	199*m*	24,70 (15) мин	α	5,484	—
	200	36,4 (5) мин	э. з.	—	0,245; 0,420; 0,462; 1,027
	200*m*	31 (2) мин	э. з., β^+	—	0,420; 0,462; 1,027
	201	108 (3) мин	э. з.	—	0,629; 0,786; 0,936; 1,014
	201*m*	$\sim$ 60 мин	э. з., и. п. α ($\geqslant$ 0,02)	— 5,28	— —
	202	1,72 (5) ч	э. з., β^+	—	0,422; 0,961
	203	11,76 (5) ч	э. з., α β^+	— 1.35	0,82** (78); 1,52** (31); 1,87* (35)
	204	11,22 (10) ч	э. з.	—	0,21**; 0,375; 0,671; 0,91**; 0,98; 1,21**
	205	15,31 (4) сут	э. з. β^+ (0,06)	— 0,98	0,703 (28); 0,988 (17); 1,766(27)
	206	6,243 (3) сут	э. з., β^+	—	0,516 (46); 0,538 (34); 0,803 (99); 0,880 (72)
	207	38 (3) лет	э. з., β^+	—	0,570 (98); 1,064 (77); 1,770
	208	$3{,}68\ (4)\cdot10^5$ лет	э. з.	—	2,614 (100)
	209	Стабилен	**100**	—	—
	210	5,013 (5) сут	β^- ($>$ 99) α ($1{,}3\cdot10^{-4}$)	1,160 4,69; 4,65	— —
	210*m*	$3{,}0\ (1)\cdot10^6$ лет	α (99,6) β^- (0,4)	4,96 (58); 4,92 (36); 4,57 (6) —	0,262 (45); 0,30 (23); 0,34; 0,61
	211	2,14 (2) мин	α (99,72) β^- (0,28)	6,62 (84); 6,28 (16) —	0,351 (14)
	212	60,55 (6) мин	β^- (64) α (36)	2,25 6,09 (10); 6,05 (26)	0,04 (2); 0,288 (0,5); 0,46** (0,8); 0,727(7); 0,785 (1,1); 1,620 (1,8)
	212m_1	25 мин	α ($\leqslant$ 93), β^- ($\geqslant$ 7)	—	—
	212m_2	9 мин	β^- ($\leqslant$ 100)	—	—
	213	45,59 (6) мин	β^- (97,8) α (2,2)	1,39 5,87	0,437
	214	19,9 (4) мин	β^- ($>$ 99) α (0,021)	3,26 5,45 (0,012); 5,51 (0,008)	0,609 (47); 0,769(5); 1,120 (17); 1,238 (6); 1,378 (5); 1,40** (4); 1,764 (17); 2,204 (5); 2,445 (2)
	215	7 мин	β^-	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{84}$Po	192	0,034 (3) с	α	7,18	—
	193	0,45 (15) с	α	6,94	—
	194	0,6 (2) с	α	6,85	—
	195	4.5 (5) с	α	6,609	—
	195 (*m*)	2,0 (2) с	α	6,699	—
	196	5,5 (5) с	α	6,520	—
	197	56 (3) с	α (90)	6,281	—
	197*m*	26 (2) с	α	6,385	—
	198	1,76 (3) мин	α (70)	6,183	—
			э. з. (30)	—	—
	199	5,2 (1) мин	э. з. (88)	—	0,362; 1,021; 1,034
			α (12)	5,952	
	199*m*	4,2 (1) мин	э. з. (61)	—	0,500; 1,002
			α (39)	6,059	
	200	11,5 (1) мин	э. з. (86)	—	0,434; 0,671; 0,797
			α (14)	5,863	
	201	15,3 (2) мин	э. з. (98,4)	—	0,890; 0,905
			α (1,6)	5,683	
	201*m*	8,9 (2) мин	и. п. (40), э. з. (57)	—	0,412; 0,967
			α (2,9)	5,786	
	202	44,7 (5) мин	э. з. (98)	—	0,166; 0,316; 0,689; 0,717; 0,791
			α (2)	5,587	
	203	36,7 (5) мин	э. з. (~ 100)	—	0,215; 0,894; 0,909; 1,091
			α (0,11)	5,384	
	203*m*	1,2 (2) мин	и. п. (96), э. з. (4)	—	0,262; 0,577; 0,905
	204	3,53 (2) ч	э. з. (> 99)	—	0,270; 0,884; 1,016
			α (0,6)	5,377	
	205	1,80 (4) ч	э. з. (> 99)	—	0,837; 0,850; 0,872; 1,001
			α (0,5)	5,22	
	206	8,8 (1) сут	э. з. (94,5)	—	0,286/35/; 0,338/40/; 0,51**/100/; 0,807/60/; 1,02**/85/
			α (5,5)	5,223	
	207	350 (4) мин	э. з. (> 99)	—	0,25/5/; 0,35/4/; 0,41/13/; 0,74/36/; 0,95/84/; 1,15/6/; 1,37/4/; 2,06/1,6/
			α (0,008)	5,116	
	207*m*	2,8 (2) с	и. п.	—	0,26 (42); 0,31 (40); 0,82 (100)
	208	2,898 (2) года	α (> 99)	5,115	0,285 (0,003); 0,60** (0,006)
			э. з. (0,0018)	—	
	209	102 (5) года	α (99,74)	4,881 (99)	0,261** (0,4); 0,91 (0,5)
			э. з. (0,26)	—	
	210	138,376 (2) сут	α	5,305 (100)	0,803 (0,0011)
	211	0,516 (3) с	α	7,45 (99)	0,570 (0,5); 0,90 (0,5)
	211*m*	25,2 (6) с	α	8,88 (7); 7,28 (91)	0,570 (92); 1,063 (77)
	212	$2{,}98\ (3)\cdot10^{-7}$ с	α	8,78 (100)	—
	212*m*	45,1 (6) с	α	11,65 (97)	0,57 (2); 2,61 (2,6)
	213	$4{,}2\ (8)\cdot10^{-6}$ с	α	8,38	—
	214	$1{,}64\ (2)\cdot10^{-4}$ с	α	7,69 (100)	—
	215	$1{,}780\ (4)\times$ $\times\ 10^{-3}$ с	α (> 99)	7,38 (100)	—
			β⁻ (0,00023)	—	—
	216	0,15 (1) с	α	6,78 (100)	—
	217	< 10 с	α	6,55	—
	218	3,05 мин	α (> 99)	6,00 (100)	—
			β⁻ (0,018)	—	—
$_{85}$At	196	0,3 (1) с	α	7,06	—
	197	0,4 (1) с	α	6,959	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	198	4,9 (5) с	α	6,755	—
	198*m*	1,5 (3) с	α	6,849	—
	199	7,0 (1) с	α	6,643	—
	200	43 (2) с	α (53) э. з. (47)	6,47; 6,42 —	— —
	201	89 (3) с	α (71) э. з. (29)	6,344 —	— —
	202	181 (3) с	э. з. (85) α (15)	— 6,23 (4,3); 6,12 (8)	0,441; 0,570; 0,675
	203	7,37 (20) мин	э. з. (69) α (31)	— 6,088	0,639; 1,002; 1,034
	204	9,2(2) мин	э. з. (95,6) α (4,4)	— 5,951	0,425; 0,515; 0,683
	205	26,2 (5) мин	э. з. (90) α (10)	— 5,902	0,629; 0,669; 0,719
	206	29,4 (3) мин	э. з. (99) α (1)	— 5,703	0,068(10), 0,396; 0,477; 0,701
	207	1,80 (4) ч	э. з. (~ 90) α (~ 10)	— 5,759	0,301; 0,588; 0,815
	208	1,63 (3) ч	э. з. (99,4) α (0,6)	— 5,65	0,18 (25); 0,25; 0,66 (100)
	209	5,41 (5) ч	э. з. (95,9) α (4,1)	— 5,647	0,195 (23); 0,545 (62); 0,780 (94)
	210	8,1 (4) ч	э. з. (99.82) α (0,18)	— 5,52 (0,05); 5,44 (0,05); 5,36 (0,06)	0,245 (79); 1,180 (100); 1,436 (29); 1,483 (48); 1,599 (14)
	211	7,214 (7) ч	э. з. (58,1) α (41,9)	— 5,868	0,67
	212	0,314 (2) с	α	7,66 (80); 7,60 (20)	0,063
	212*m*	0,119 (3) с	α	7,88 (20); 7,62 (80)	0,063
	213	$1,1\ (2)\cdot10^{-7}$ с	α	9,08	—
	214	$2\cdot10^{-6}$ с	α	8,78 (99)	—
	215	$1\cdot10^{-4}$ с	α	8,026	—
	216	$3\cdot10^{-4}$ с	α	7,80 (97); 7,70	—
	217	0,0323 (4) с	α (> 99) β^- (0,012)	7,069 —	— —
	218	~ 2 с	α (99,9) β^- (0,1)	6,70 (94); 6,65 (6) —	— —
	219	0,9 (1) мин	α (~ 97) β^- (~ 3)	6,27 —	— —
$_{86}$Rn	200	1,0 (2) с	α	6,91	—
	201	7,0 (4) с	α	6,72	—
	202	9,85 (20) с	α (> 70)	6,64	—
	203	45 (3) с	α (65) э. з. (35)	6,498 —	— —
	203*m*	28 (2) с	α	6,548	—
	204	1,24 (3) мин	α (~ 72) э. з. (~ 28)	6,417 —	— —
	205	2,83 мин	э. з. (77) α (23)	— 6,263	0,265; 0,465; 0,620
	206	5,67 (17) мин	α (64) э. з. (36)	6,260 —	0,325; 0,387; 0,498
	207	9,3 (2) мин	э. з. (77) α (23)	— 6,133	0,345; 0,747
	208	24,35 (13) мин	α (52) э. з. (48)	6,141 —	0,251; 0,287; 0,350; 0,952

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	209	28,5 (10) мин	э. з. (83) α (17)	— 6,039	} 0,338; 0,408; 0,689; 0,746
	210	2,4 (1) ч	α (96) э. з. (4)	6,040 —	} 0,458
	211	14,6 (2) ч	э. з. (74) α (26)	— 5,85 (9); 5,78 (17)	} 0,445 (29); 0,680 (74); 0,865 (18); 0,946 (21); 1,13 (23); 1,37 (38)
	212	24 (2) мин	α	6,264	—
	213	0,025 (2) с	α	8,09	—
	214	$2{,}7\,(2)\cdot10^{-7}$ с	α	9,04	—
	215	$2{,}30\,(10)\cdot10^{-6}$ с	α	8,67	—
	216	$4{,}5\,(5)\cdot10^{-5}$ с	α	8,05	—
	217	$5{,}4\,(5)\cdot10^{-4}$ с	α	7,740	—
	218	0,035 (5) с	α	7,14 (99,8)	0,609 (0,2)
	219	3,96 (1) с	α	6,82 (81); 6,55 (11); 6,42 (8)	0,272 (9); 0,401 (5)
	220	55,6 (1) с	α	6,29 (100)	0,55 (0,07)
	221	25 (2) мин	β^- (~ 80) α (~ 20)	1,1; 0,8 6,037; 5,788; 5,778	} 0,150; 0,186
	222	3,8235 (3) сут	α	5,49 (100)	0,510 (0,07)
	223	43 (5) мин	β^-	—	—
	224	107 (3) мин	β^-	—	0,261; 0,266
	225	4,5 (3) мин	β^-	—	—
	226	6,0 (5) мин	β^-	—	—
$_{?}$Fr	202	0,34 (4) с	α	7,251	—
	203	0,7 (3) с	α	7,132	—
	204	2,1 (2) с	α	7,028; 6,970	—
	205	3,7 (1) с	α	6,916	—
	206	16,0 (1) с	α (85) э. з. (15)	6,790 —	} 0,559; 0,575; 0,629
	207	14,8 (1) с	α (93) э. з. (7)	6,767 —	— —
	208	59,0 (20) с	α (74) э. з. (26)	6,636 —	} 0,325; 0,636; 0,779
	209	50,0 (3) с	α (89) э. з. (11)	6,648 —	— —
	210	3,18 (6) мин	α э. з.	6,543 —	} 0,644; 0,817
	211	3,10 (2) мин	α, э. з.	6,535	0,281; 0,540; 0,918
	212	20,0 (6) мин	э. з. (56) α (44)	— 6,42 (16); 6,39 (17); 6,35 (11)	} 0,227; 1,185; 1,274
	213	34,6 (3) с	α (99,45) э. з. (0,55)	6,775 —	— —
	214	0,005 (2) с	α	8,426; 8,356	—
	214*m*	0,00335 (5) с	α	8,547; 8,477	—
	215	$9\,(1)\cdot10^{-8}$ с	α	9,36	—
	216	$70\,(2)\cdot10^{-8}$ с	α	9,01	—
	217	$22\,(5)\cdot10^{-6}$ с	α	8,315	—
	218	$7\,(6)\cdot10^{-4}$ с	α	7,85 (93); 7,57	—
	219	0,021 (1) с	α	7,313	—
	220	27,4 (3) с	α (99,65) β^- (0,35)	6,68 (85); 6,64 (13) —	} 0,045; 0,106; 0,162
	221	4,9 (2) мин	α	6,34 (82); 6,12 (15)	0,218 (14)
	222	14,4 (4) мин	β^- (> 99) α (0,01—0,1)	1,8 —	— —
	223	21,8 (4) мин	β^- (> 99) α (~ 0,005)	1,15 5,34	} 0,050 (40); 0,080 (13); 0,234 (4)
	224	2,67 (20) мин	β^-	2,8; 2,6	0,132; 0,216; 0,837; 1,341
	225	3,9 (2) мин	β^-	1,6	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	226	48 (1) с	β^-	3,5; 3,2	0,186; 0,254; 1,323
	227	2,4 (2) мин	β^-	2,4; 1,8	0,090; 0,586
	228	39 (1) с	β^-	—	0,474
	229	50 (20) с	β^-	—	0,310
$_{88}$Ra	206	0,4 (2) с	α	7,272	—
	207	1,3 (2) с	α	7,133	—
	208	1,3 (2) с	α	7,13	—
	209	4,6 (2) с	α	7,010	—
	210	3,7 (2) с	α	7,019	—
	211	13 (2) с	α	6,911	—
	212	13,0 (2) с	α	6,9001	—
	213	2,74 (6) мин	α (80), э. з. (20)	6,73; 6,62	0,110; 0,215
	214	2,46 (3) с	α (> 99), э. з. (0,059)	7,136	—
	215	$1{,}59\,(9)\cdot10^{-3}$ с	α	8,699	—
	216	$1{,}82\,(10)\cdot10^{-7}$ с	α	9,349	—
	217	$1{,}6\,(2)\cdot10^{-6}$ с	α	8,99	—
	218	$1{,}4\,(2)\cdot10^{-5}$ с	α	8,39	—
	219	0,01 (3) с	α	7,98; 7,68	—
	220	0,023 (5) с	α	7,46 (99)	0,465 (1)
	221	28 (2) с	α	6,76 (30); 6,67 (20); 6,61 (34); 6,59 (8)	0,091 (3,5); 0,151 (13); 0,175 (2)
	222	38,0 (5) с	α	6,56 (96); 6,23	0,325 (4)
	223	11,434 (2) сут	α	5,75 (9); 5,71 (54); 5,61 (26); 5,54 (9)	0,149** (10); 0,270 (10); 0,33** (6)
	224	3,66 (4) сут	α	5,68 (94); 5,45 (6)	0,241 (3,7)
	225	14,8 (2) сут	β^-	0,36	0,040 (33)
	226	1600 (7) лет	α	4,78 (95); 4,60 (6)	0,186 (4)
	227	42,2 (5) мин	β^-	1,31	0,291 (4); 0,498 (0,6)
	228	5,75 (3) года	β^-	0,04	—
	229	4,0 (2) мин	β^-	1,8	—
	230	93 (2) мин	β^-	0,8	0,063; 0,072; 0,203; 0,470
$_{89}$Ac	209	0,10 (5) с	α	7,59	—
	211	0,25 (5) с	α	7,48	—
	212	0,93 (5) с	α	7,38	—
	213	0,80 (5) с	α	7,36	—
	214	8,2 (2) с	α (⩾ 86), э. з. (⩽ 14)	7,214; 7,082	—
	215	0,17 (1) с	α (99,91), э. з. (0,09)	7,604	—
	216	$\sim 3{,}3\cdot10^{-4}$ с	α	9,07; 8,99	—
	217	$1{,}11\,(3)\cdot10^{-7}$ с	α	9,65	—
	218	$2{,}7\,(4)\cdot10^{-7}$ с	α	9,21	—
	219	$7\,(2)\cdot10^{-6}$ с	α	8,66	—
	220	$2{,}61\,(5)\cdot10^{-2}$ с	α	7,85; 7,68; 7,61	0,134
	221	0,052 (2) с	α	7,65; 7,44; 7,38	—
	222	4,2 (5) с	α	7,013 (93); 6,967	—
	223	2,2 (1) мин	α (~ 99)	6,66 (38); 6,65 (42); 6,57 (13)	0,082 (0,2); 0,096 (0,2)
			э. з. (1)	—	
	224	2,9 (2) ч	α (~ 10)	6,20 (3); 6,14 (3); 6,04 (3)	0,132 (28); 0,217 (62)
	225	10,0 (1) сут	э. з. (~ 90)	—	
	226	29 ч	α	5,83 (54); 5,79 (28); 5,73* (10)	0,099; 0,150; 0,187
			β^- (83)	1,1; 0,9	0,158 (32); 0,185 (9);
			э. з. (17); α (0,006)	5,34	0,230 (47); 0,253 (11)
	227	21,773 (3) года	β^- (98,62) α (1,38)	0,046 4,95* (1,2); 4,86* (0,18)	0,070; 0,166; 0,190

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	228	6,13 ч	β^-	2,1; 1,2	0,34** (15); 0,908 (25); 0,96** (20)
	229	62,7 (5) мин	β^-	1,1	0,14*; 0,16; 0,26; 0,57
	230	122 (3) с	β^-	2,7	0,455; 0,508; 1,244
	231	7,5 (1) мин	β^-	2,1	0,185; 0,28; 0,39; 0,71
	232	35 (5) с	β^-	—	—
$_{90}$Th	213	0,150 (25) с	α	7,69	—
	214	0,125 (25) с	α	7,68	—
	215	1,2 (2) с	α	7,52; 7,39	—
	216	0,028 (2) с	α	7,92	—
	217	$2{,}52\ (7)\cdot10^{-4}$ с	α	9,25	—
	218	$1{,}09\ (13)\cdot10^{-7}$ с	α	9,67	—
	219	$1{,}05\ (3)\cdot10^{-6}$ с	α	9,34	—
	220	$9{,}7\ (6)\cdot10^{-6}$ с	α	8,79	—
	221	$1{,}68\ (6)\cdot10^{-6}$ с	α	8,47; 8,15	—
	222	$2{,}8\ (3)\cdot10^{-6}$ с	α	7,98	—
	223	0,66 (1) с	α	7,32; 7,29	
	224	1,04 (5) с	α	7,18 (79); 6,91 (19)	0,177 (9); 0,235 (0,4); 0,297 (0,3); 0,410 (0,8)
	225	8,0 (5) мин	α (~ 90)	6,80 (8); 6,75 (6); 6,50 (12); 6,48 (39): 6,44 (13)	0,246 (5); 0,322 (27); 0,362 (5); 0,45 (1); 0,49 (1)
			э. з. (~ 10)	—	
	226	30,9 мин	α	6,34 (79); 6,22 (19)	0,111 (3,4); 0,242 (1,2)
	227	18,718 (5) сут	α	6,04 (23); 5,98 (24); 5,76 (21); 5,72* (14)	0,050 (8); 0,237** (15); 0,31** (8)
	228	1,91313 (88) лет	α	5,42 (73); 5,34 (27)	0,084 (1,6); 0,132 (0,2); 0,167 (0,1); 0,214 (0,3); 0,239
	229	7340 (160) лет	α	5,05 (5); 4,97** (9); 4,90 (10); 4,84 (56); 4,81 (9)	0,137** (~ 3); 0,20* (~ 10)
	230	$7{,}538\ (30) \times 10^4$ лет	α	4,69 (76); 4,62 (24)	0,068 (0,6); 0,142 (0,07)
	231	25,52 (1) ч	β^-	0,40; 0,30	0,026 (2); 0,084** (10)
	232	$14{,}05\ (6)\cdot10^9$ лет	α **100**	4,01 (77); 3,95 (23)	—
				—	—
	233	22,3 (1) мин	β^-	1,23	0,029 (2,1); 0,087 (2,7); 0,171 (0,7); 0,453 (1)
	234	24,10 (3) сут	β^-	0,191	0,063* (3,5); 0,093* (4)
	235	6,9 (2) мин	β^-	—	0,416—0,932
	236	37,1 (15) мин	β^-	1,1; 1,0	0,11
$_{91}$Pa	216	0,20 (4) с	α	7,87; 7,81	—
	217	$4{,}9\ (6)\cdot10^{-3}$ с	α	8,33	—
	222	$5{,}7\ (5)\cdot10^{-3}$ с	α	8,54; 8,33; 8,21	—
	223	$6{,}3\ (10)\cdot10^{-3}$ с	α	8,20; 8,01	—
	224	0,95 (15) с	α	7,49	—
	225	1,8 (3) с	α	7,25; 7,20	—
	226	1,8 (2) мин	α (74)	6,86 (38); 6,82 (34)	—
			э. з. (26)	—	—
	227	38,3 (3) мин	α (~ 85)	6,47 (43); 6,42** (23); 6,40 (8); 6,36 (7)	0,065** (6); 0,110 (2)
			э. з. (~ 15)	—	
	228	22 (1) ч	э. з. (~ 98)	—	0,14 (3); 0,20 (9); 0,28 (5); 0,33 (18); 0,41 (13); 0,46 (32); 0,95 (93); 1,57 (7); 1,85 (4)***
			α (~ 2)	6,11* (1); 6,08 (0,4); 6,03 (0,2); 5,80 (0,2)	
	229	1,4 (4) сут	э. з. (99,75)	—	—
			α (0,25)	5,67 (0,05); 5,62** (0,07); 5,58 (0,10); 5,54 (0,03)	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	230	17,4 (5) сут	э. з. (90) β^- (10) α (0,0032)	—	} 0,45** (18); 0,91** (24); 0,95 (50)
	231	32760 (110) лет	α	0,41 5,34; 5,32; 5,30 5,06 (11); 5,03 (20); 5,01 (25); 4,95 (23); 4,73 (11)	0,027 (6); 0,29** (6)
	232	1,31 (2) сут	β^-	1,3 (0,7); 0,32	0,150 (12); 0,87** (51); 0,97(40)
	233	27,0 (1) сут	β^-	0,568 (5); 0,257	0,31** (44); 0,34
	234	6,70 (5) ч	β^-	1,3 (⩽ 2); 1,13 (13); 0,53	0,100 (50); 0,126 (26); 0,70 (24); 0,90 (70)***
	234*m*	1,17 (3) мин	β^- (99,87) и. п. (0,13)	2,29 —	} 0,765 (0,30); 1,001 (0,60)
	235	24,1 (2) мин	β^-	1,4	0,128—0,659
	236	9,1 (2) мин	β^-	3,3	0,64; 0,69; 1,76
	237	8,7 (2) мин	β^-	2,3	0,090/50/; 0,145/45/; 0,205/55/; 0,330/40/; 0,46/100/, 0,75/50/; 0,87/100/; 0,92/100/
$_{92}$U	226	0,5 (2) с	α	7,43	—
	227	1,1 (3) мин	α	6,87	—
	228	9,1 (2) мин	α (⩾ 95)	6,69/70/; 6,60/29/	0,152 (0,2); 0,187 (0,3); 0,246 (0,4)
	229	58 (3) мин	э. з. (~ 80) α (~ 20)	—	—
	230	20,8 сут	α	6,36 (13); 6,33 (4); 6,30 (3)	
			э. з. (> 99)	5,89 (67); 5,82 (32)	0,072 (0,54); 0,231 (0,18)
	231	4,2 (1) сут	α (0,0055)	—	} 0,084 (7); 0,218 (1)
	232	68,9 (4) года	α	5,46	} 0,058 (0,21); 0,129 (0,082)
			с. д. ($0{,}9\cdot10^{-10}$)	5,32 (69); 5,26 (31)	
	233	1,592 (2) × × 10^5 лет	α	—	0,029/60/; 0,042/310/; 0,055/68/; 0,097/100/; 0,164/27/; 0,32*/43/
			с. д. ($1{,}3\cdot10^{-10}$)	4,82 (84); 4,78 (13); 4,73 (1,5)	—
	234	2,45 (2) × × 10^5 лет	α	—	0,053 (0,2)
			с. д. ($1{,}7\cdot10^{-9}$)	4,77 (72); 4,72 (28)	—
			0,0055 (5)	—	—
	235	7,038 (5) × × 10^8 лет	**0,7200 (12)**	—	—
			α	4,58* (8); 4,40 (62); 4,36 (18); 4,22 (6)	0,143 (11); 0,185 (54); 0,204 (5)
			с. д. ($7{,}2\cdot10^{-9}$)	—	—
	235*m*	26,1 мин	и. п.	—	0,000076
	236	2,3416 (39) × × 10^7 лет	α	4,49 (74); 4,44 (26)	—
			с. д. ($9{,}6\cdot10^{-8}$)	—	—
	237	6,75 (1) сут	β^-	0,248	0,026 (2); 0,060 (36); 0,165 (2); 0,208 (23)
	238	4,468 (3) × × 10^9 лет	**99,2745 (15)**	—	—
			α	4,20 (77); 4,15 (23)	—
			с. д. ($5{,}4\cdot10^{-5}$)	—	—
	239	23,50 (5) мин	β^-	1,29	0,044 (4); 0,075 (51)
$_{93}$Np	240	14,1 (2) ч	β^-	0,36	0,044
	227	1,1 (3) мин	α	—	—
	229	4,0 (2) мин	α	6,89	—
	230	4,6 (3) мин	α (> 99), э. з. (⩽ 0,97)	6,66	—
	231	48,8 (2) мин	э. з. (< 99), α (> 1)	6,29	0,264; 0,348; 0,371
	232	14,7 (3) мин	э. з.	—	
	233	36,2 (1) мин	э. з. (> 99), α (~ 0,001)	5,54	0,28; 0,33; 0,82; 0,86**
					—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	234	4,4 (1) сут	э. з. β^+ (~ 0,05)	— 0.8	0,109; 0,23; 0,25; 0,45; 0,50; 0,75; 0,95; 1,21; 1,56***
	235	396,2 (12) сут	э. з. (> 99) α (0,0016)	— 5,02; 5,00	— —
	236	1,15 (12) × × 10^5 лет	э. з. (91) β^- (9)	— —	0,104; 0,160
	237	2,14 (1) × × 10^6 лет	α	4,79 (51); 4,77 (25); 4,65* (9)	0,030 (14); 0,086 (14); 0,145 (1)
	238	2,117 (2) сут	β^-	1,25	1,01** (42)
	239	2,355 (4) сут	β^-	0,713 (11); 0,437	0,106 (23); 0,209 (4); 0,228 (12); 0,278 (14)
	240	65 (3) мин	β^-	0,89	0,16; 0,25; 0,44; 0,56; 0,60; 0,92; 1,00; 1,16
	240*m*	7,4 (2) мин	β^-	2,16	0,56 (21); 0,60 (13); 0,92** (3); 1,5** (3)
	241	16,0 (2) мин	β^-	1,3	0,133; 0,174
$_{94}$Pu	232	34,1 (7) мин	э. з. (⩾ 80) α (⩽ 20)	— 6,59; 6,54	— —
	233	20,9 (4) мин	э. з. (~ 100) α (0,12)	— 6,31	0,235; 0,535
	234	8,8 (1) ч	э. з. (94) α (6)	— 6,20 (4); 6,15 (1,9)	— —
	235	25,3 (10) мин	э. з. (> 99) α (0,003)	— 5,86	— —
	236	2,851 (8) года	α	5,77 (69); 5,72 (31)	0,048 (0,31); 0,109 (0,012)
	237	45,3 (2) сут	э. з. (> 99) α (0,0033)	— 5,66/21/; 5,37/79/	0,060 (5)
	237 *m*	0,18 с	и. п.	—	0,145 (2)
	238	87,74 (4) года	α с. д. ($1{,}84\cdot10^{-7}$)	5,50 (72); 5,46 (28) —	0,099 ($8\cdot10^{-3}$); 0,150 ($1\cdot10^{-3}$) —
	239	24119 (26) лет	α с. д. ($4{,}4\cdot10^{-10}$)	5,15* (88); 5,10 (11,5) —	0,039 (0,007); 0,052 (0,020); 0,129 (0,005); 0,375 (0,0012); 0,414 (0,0012) —
	240	6537 (10) лет	α с. д. ($5{,}7\cdot10^{-6}$)	5,17 (76); 5,12 (24) —	0,65** ($2\cdot10^{-5}$) —
	241	14,4 (2) года	α ($2{,}4\cdot10^{-3}$) β^- (> 99)	4,90 (0,0019); 4,85 (0,0003) 0,021	0,145 ($1{,}6\cdot10^{-4}$)
	242	3,763 (20) × × 10^5 лет	α с. д. ($5{,}5\cdot10^{-4}$)	4,90 (74); 4,86 (26) —	— —
	243	4,956 (3) ч	β^-	0,58	0,084 (21); 0,381 (0,7)
	244	8,08 (10) × × 10^7 лет	α с. д. ($1{,}25\cdot10^{-1}$)	4,59; 4,55 —	— —
	245	10,5 (1) ч	β^-	1,2; 0,9	0,33; 0,56
	246	10,85 (2) сут	β^-	0,33 (10); 0,15	0,044 (30); 0,180 (10); 0,224 (25)
$_{95}$Am	232	55 (7) с	—	—	—
	234	2,6 (2) мин	э. з., с. д.	—	—
	237	73,0 (10) мин	э. з. (> 99) α (0,025)	— 6,04	0,280; 0,438; 0,474; 0,909
	238	98 (2) мин	э. з. (> 99) α ($1\cdot10^{-4}$)	— 5,94	0,36 (12); 0,58 (29); 0,98* (80); 1,35 (76)
	239	11,9 (1) ч	э. з. (> 99) α (0,01)	— 5,78	0,209 (5); 0,228* (18); 0,278 (17)
	240	50,8 (3) ч	э. з. (> 99) α ($1{,}9\cdot10^{-4}$)	— 5,378	0,90 (23); 1,00 (77)
	241	432,2 (5) года	α	5,49 (85); 5,44 (13)	0,026 (2,5); 0,060 (36); 0,101** (0,04)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	242	16,02 (2) ч	β^- (82,7) э. з. (17,3)	0,67	—
	242*m*	152 (7) года	и. п. (99,52) α (0,48)	— —	— 0,049 (0,20); 0,087 (0,036)
	243	7380 (40) лет	с. д. ($1{,}6\cdot10^{-8}$) α	5,21 (0,41) —	— 0,044 (4); 0,075 (50)
	244	10,1 (1) ч	с. д. ($2{,}2\cdot10^{-6}$) β^-	5,28 (88); 5,23 (11) —	— 0,099 (5); 0,154 (19); 0,746 (66); 0,900 (25)
	244*m*	~ 26 мин	β^- (> 99) э. з. (0,036)	0,387 1,50	— —
	245	2,05 (1) ч	β^-	—	0,253
	246	39 (3) мин	β^-	0,91	0,799 (29); 1,07** (65)
	247	22 (3) мин	β^-	2,10 (7); 1,60	0,23; 0,28
$_{96}$Cm	238	2,4 (1) ч	э. з. (< 90) α (> 10)	— 6,52	— —
	239	~ 2,9 ч	э. з.	—	0,188
	240	27 (1) сут	α	6,29 (72); 6,25 (28)	—
	241	32,8 (2) сут	э. з. (99) α (1)	— 5,94	0,475 (95); 0,60
	242	162,8 (4) сут	α	6,11 (74); 6,07 (26)	0,044 (0,041); 0,102 ($4\cdot10^{-3}$)
	243	28,5 (2) года	с. д. ($6{,}8\cdot10^{-6}$) α (99,76)	— 6,06* (6); 5,99* (6); 5,78 (73); 5,74 (11)	— 0,209 (4); 0,228 (12); 0,278 (14)
	244	18,10 (2) года	э. з. (0.26) α	— 5,80 (77); 5,76 (23)	0,043 (0,02); 0,100 (0,0015); 0,150 (0,0013)
	245	8500 (100) лет	с. д. ($1{,}3\cdot10^{-4}$) α	—	—
	246	4730 (100) лет	α	5,36 (91); 5,31 (6) 5,39 (79); 5,34 (21)	0,13 (5); 0.173 (14)
	247	$1{,}56\ (5)\times10^7$ лет	с. д. ($2{,}6\cdot10^{-2}$) α	— 5,27; 4,87	— 0,278; 0,402
	248	$3{,}40\ (4)\times10^5$ лет	α (91,74)	5,08 (82); 5,04 (18)	—
	249	64,15 (3) мин	с. д. (8,26) β^-	—	—
	250	~ 7400 лет	с. д. (~ 65), α (~ 28), β^- (~ 7)	0,9 —	0,634 —
	251	16,8 (2) мин	β^-	1,4	0,39; 0,44; 0,53; 0,54
$_{97}$Bk	242	7 мин	э. з.	—	—
	243	4,5 (2) ч	э. з. (99,85) α (0,15)	— 6,76 (0,023); 6,72 (0,019); 6,57 (0,038); 6,54 (0,029); 6,21 (0,020)	0,755; 0,84; 0,946
	244	4,35 (15) ч	э. з. (> 99) α (0,006)	— 6,67 (0,003); 6,62 (0,003)	0,218 (100); 0,892 (88)
	245	4,94 (3) сут	э. з. (99,88) α (0,12)	— 6,36 (0,018); 6,32 (0,017); 6,15 (0,021); 6,12 (0,016); 5,89 (0,024)	0,253 (31); 0,39* (3)
	246	1,80 (2) сут	э. з.	—	0,800 (40); 1,07** (12)
	247	1380 (250) лет	α	5,69 (37); 5,53 (58)	0,084 (40); 0,27 (30)
	248	23,7 (2) ч	β^- (70) э. з. (30)	0,9 —	0,551

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	249	320 (6) сут	β^- (> 99) α (0,0015) с. д. ($4{,}7\cdot10^{-8}$)	0,125 5,42 (0,0015); 5,39 —	} 0,32* ($3\cdot10^{-5}$) —
	250	3,217 (5) ч	β^-	1,76 (11); 0,73	0,990 (47); 1,032 (39)
	251	56 (2) мин	β^-	~ 1,0	0,153; 0,178
$_{98}$Cf	240	1,06 (15) мин	α	7,59	—
	241	3,78 (70) мин	α	7,342	—
	242	3,68 (44) мин	э. з., α	7,392; 7,358	—
	243	10,7 (5) мин	э. з. (~ 86) α (~ 14)	— 7,17; 7,06	— —
	244	19,4 (6) мин	α	7,213; 7,176	—
	245	43,6 (8) мин	э. з. (~ 70) α (~ 30)	— 7,137	— —
	246	35,7 (5) ч	α с. д.	6,76 (78); 6,72 (22) —	— —
	247	3,11 (3) ч	э. з. (99,96) α (0,04)	— 6,301	} 0,295 (1); 0,417; 0,460
	248	333,5 (28) сут	α с. д.	6,27 (82); 6,22 (18) —	— —
	249	351 (2) год	α с. д. ($5{,}2\cdot10^{-7}$)	5,81 (84); 5,76 (4) —	0,333 (16); 0,388 (72) —
	250	13,08 (9) года	α с. д. ($7{,}7\cdot10^{-2}$)	6,03 (85); 5,99 (15) —	— —
	251	898 (44) лет	α	5,85 (45); 5,67 (55)	0,18; 0,23
	252	2,638 (10) года	α (96,91) с. д. (3,09)	6,12 (84); 6,08 (16) —	— —
	253	17,81 (8) сут	β^- (99,69) α (0,31)	0,27 5,98	— —
	254	60,5 (2) сут	с. д. (99,69) α (0,31)	— 5,834	— —
	255	1,9 (6) ч	β^-	—	—
	256	12,3 (12) мин	с. д.	—	—
$_{99}$Es	243	21 (2) с	э. з., α	7,89	—
	244	37 (4) с	э. з. (96), α (4)	7,57	—
	245	1,33 (15) мин	э. з. (60) α (40)	— 7,73	— —
	246	7,7 (5) мин	э. з. (90) α (10)	— 7,36	— —
	247	4,7 (3) мин	э. з. (~ 93) α (~ 7)	— 7,31	— —
	248	27 (3) мин	э. з. (99,7) α (0,3)	— 6,87	— —
	249	102,2 (6) мин	э. з. (99,4) α (0,6)	— 6,77	} 0,38*; 0,81
	250	8,6 (1) ч	э. з.	—	0,303; 0,349; 0,829
	251	33 (1) ч	э. з. (99,5) α (0,5)	— 6,49; 6,46	} 0,178
	252	471,7 (19) сут	α (78) э. з. (22)	6,64 (82); 6,58 (13) —	} 0,228 (0,23); 0,278 (0,21); 0,40** (1,1)
	253	20,47 (3) сут	α с. д. ($8{,}7\cdot10^{-6}$)	6,63 (90) —	0,387** (0,05) —
	254	275,7 (5) сут	α с. д.	6,43 (93) —	0,063 (2); 0,27** (12); 0,31* (0,22) —
	254*m*	39,3 (2) ч	β^- (99,59) α (0,33) э. з. (0,08)	1,13 (25); 0,43 6,382 —	} 0,65 (31); 0,69** (38)
	255	39,8 (12) сут	β^- (92) α (8) с. д. (0,004)	— 6,30; 6,26 —	— — —

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	256	7,6 ч	β^-	—	0,22; 0,23; 0,86
$_{100}$Fm	243	0,18 (6) с	α	8,55	—
	244	0,0037 (4) с	с. д.	—	—
	245	4,2 (13) с	α	8,15	—
	246	1,1 (2) с	α (92)	8,24	—
			с. д. (8)	—	—
	247	35 (4) с	α (⩾ 50)	7,93; 7,87	—
			э. з. (⩽ 50)	—	—
	248	36 (3) с	α (99,9)	7,87; 7,83	—
			с. д. (0,1)	—	—
	249	2,6 (7) мин	α	7,53	—
	250	30 (3) мин	α	7,43	—
	251	5,30 (8) ч	э. з. (98,2)	—	} 0,453; 0,881
			α (1,8)	6,83; 6,78	
	252	25,39 (5) ч	с. д.	—	—
			α	7,04; 7,00	—
	253	3,00 (12) сут	э. з. (88)	—	} 0,145; 0,272
			α (12)	6,94 (9); 6,67 (2)	
	254	3,240 (2) ч	α (> 99)	7,20 (82); 7,16 (17)	—
			с. д. (0,059)	—	—
	255	20,07 (7) ч	α	7,02 (93); 6,96	0,059* (0,9); 0,081* (1; 1)
			с. д.	—	—
	256	157,6 (13) мин	с. д. (91,9)	—	—
			α (8,1)	6,917	—
	257	100,5 (2) сут	α (99,79)	6,52 (94)	0,180 (8); 0,242 (10)
			с. д. (0,21)	—	—
	258	0,000380 (60) с	с. д.	—	—
	259	1,5 (3) с	с. д.	—	—
$_{101}$Md	248	7 (3) с	э. з. (80), α (20)	8,36; 8,32	—
	249	24 (4) с	э. з. (⩽ 80),	—	—
			α (⩾ 20)	8,03	
	250	52 (6) с	э. з. (94), α (6)	7,82; 7,75	—
	251	4,0 (5) мин	э. з. (⩾ 90)	—	—
			α (⩽ 10)	7,55	
	252	2,3 (8) мин	э. з.	—	—
	254	10 (3) мин	э. з.	—	—
	255	27 (2) мин	э. з. (92)	—	} 0,430
			α (8)	7,326	
	256	76 (4) мин	э. з. (90,1)	—	} 0,400
			α (9,9)	7,205; 7,138	
	257	5,2 (5) ч	э. з. (90)	—	—
			α (10)	7,063	—
	258	55 (4) сут	α	6,79; 6,72	—
$_{102}$No	250	0,00025 (5) с	α	—	—
	251	0,8 (3) с	α	8,68 (20); 8,58 (80)	—
	252	2,30 (22) с	α (73)	8,42; 8,37	—
			с. д. (27)	—	—
	253	1,7 (3) мин	α	8,01	—
	254	55 (5) с	α	8,10	—
	254*m*	0,28 с	и. п.	—	—
	255	3,1 (2) мин	α	8,12; 8,08; 7,93	—
	256	3,3 (2) с	α (~ 99,7)	8,44; 8,40	—
			с. д. (0,3)	—	—
	257	25 (2) с	α	8,27 (50); 8,22 (50)	—
	258	0,0012 с	с. д.	—	—
	259	60 мин	α (~ 78)	7,53; 7,50	—
			э. з. (~ 22)	—	—
$_{103}$Lr	255	22 (4) с	α	8,43; 8,37	—
	256	28 (3) с	α	8,52; 8,43; 8,39	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или относительная распространенность стабильного изотопа, %	Энергия, МэВ (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
	257	0,646 (25) с	α	8,86; 8,80	—
	258	4,3 (5) с	α	8,65; 8,61; 8,59	—
	259	5,4 (8) с	α	8,45	—
	260	180 (30) с	α	8,03	—
$_{104}$Ku	253	~ 1,8 с	с. д. (~ 50)	—	—
	254	0,0005 (2) с	с. д.	—	—
	256	~ 0,0005 с	с. д.	—	—
	257	4,8 (3) с	α	9,00; 8,95	0,127
	258	0,011 (2) с	с. д.	—	—
	259	3,1 (7) с	α	8,87; 8,77	—
	260	< 0,08 с	с. д.	—	—
	261	65 (10) с	α	8,28	—
105	255	~ 1,2 с?	с. д. (~ 20)	—	—
	257	5,0 (12) с	с. д. (~ 20), α	9,16	—
	260	1,52 (13) с	α (90), с. д. (10)	9,12; 9,07; 9,04	—
	261	1,8 (4) с	α (~ 75), с. д. (~ 25)	8.93	—
	262	34 (4) с	α (~ 40), с. д. (~60)	8,66; 8,45	—
106	259	0,007 (3) с	с. д. (~70), α (?)	—	—
	263	0,8 (2) с	α	9,25; 9,06	—
107	261	$(1—2)\cdot10^{-3}$ с	с. д. (~ 20), α	—	—

В шестой колонке даны значения энергии (в мегаэлектрон-вольтах) основного γ-излучения, сопровождающего распад нуклида. В круглых скобках приведена интенсивность γ-излучения (в процентах), отнесенная к полному числу распадов. В косых скобках указана (в процентах) относительная интенсивность γ-излучения. Если после значения энергии скобки отсутствуют, это показывает, что интенсивность точно не определена. В ряде случаев приведен диапазон значений энергии γ-излучения. Символ 0,511 (ан.) означает, что γ-излучение имеет аннигиляционное происхождение. Одной, двумя и тремя звездочками отмечены дублет, сложная линия и случай, когда все линии сложные.

Более детальные сведения о типах распада и ядерной структуре нуклидов, содержащиеся в международном файле ENSDF, могут быть получены через Центр по атомным и ядерным данным (ЦАЯД) Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР.

37.2. ЭТАЛОННЫЕ ЭНЕРГИИ γ-ИЗЛУЧЕНИЯ, α-ЧАСТИЦ И КОНВЕРСИОННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

В повседневной работе со спектрометрической аппаратурой полезны наборы эталонных значений энергии излучения как с точки зрения интерпретации спектров излучений, так и для градуировки спектрометрической аппаратуры.

В табл. 37.2 представлены эталонные значения энергии γ-квантов [1, 2]. Значения E_γ охватывают диапазон энергий от 12 до 3500 кэВ и расположены в порядке возрастания энергии γ-квантов. Значения в скобках здесь и далее отвечают погрешности в младших разрядах значащих цифр.

В табл. 37.3 приведены энергии и абсолютные интенсивности γ-квантов [1, 2, 4] для некоторых нуклидов, испускающих один или несколько сильных γ-квантов и наиболее удобных для градуировки полупроводниковых спектрометров. В табл. 37.4 приведены значения наиболее интенсивных групп α-частиц в диапазоне энергий излучения от 2,5 до 7,7 МэВ [1, 2]. Значения E_α расположены в порядке возрастания.

В табл. 37.5 собраны значения энергий и интенсивностей конверсионных электронов в диапазоне E_e от 25 до 2500 кэВ [2], полезные для интерпретации спектров конверсионных электронов и градуировки электронных спектрометров.

В табл. 37.6 для ряда нуклидов приведены мультипольности наиболее интенсивных γ-переходов и экспериментально определенные значения коэффициентов внутренней конверсии.

Таблица 37.2. **Эталонные энергии γ-квантов в диапазоне энергий E_γ от 12 до 3500 кэВ [1,2]**

Нуклид	Период полураспада	E_γ, кэВ
^{241}Am(NpL$_1$)*1	432,2 года	11,890 (7)
^{57}Co	270,9 сут	14,41302 (32)
^{241}Am(NpL$_\beta$)*1	432,2 года	17,8 (1)
^{241}Am(NpL$_\gamma$)*1	432,2 года	20,8 (1)
^{109}Cd (Ag K_α)*1	464 сут	22,1 (1)
^{109}Cd (Ag K_β)*1	464 сут	25,0 (1)
^{241}Am	432,2 года	26,345 (5)
^{137}Cs (Ba K_α)*1	30,0 лет	32,1 (1)
^{137}Cs (Ba $K_{\beta'}$)*1	30,0 лет	36,4 (1)
^{183}Ta	5,1 сут	46,48502 (16)
^{183}Ta	5,1 сут	52,59648 (12)
^{133}Ba	10,5 года	53,156 (5)
^{241}Am	432,2 года	59,537 (1)
^{169}Yb	32,022 сут	63,12081 (4)
^{182}Ta	115 сут	65,72247 (14)
^{182}Ta	115 сут	67,74998 (12)
^{153}Sm	46,7 ч	69,67340 (10)
^{203}Hg (Tl K_{α_2})*1	46,6 сут	70,8319 (8)
^{203}Hg(Tl K_{α_1})*1	46,6 сут	72,8715 (9)
^{153}Sm	46,7 ч	75,42257 (17)
^{108m}Ag	127 лет	79,14 (3)
^{133}Ba	10,5 года	80,999 (4)
^{153}Sm	46,7 ч	83,36765 (14)
^{182}Ta	115 сут	84,6823 (8)
^{109}Cd	464 сут	88,0341 (11)
^{153}Sm	46,7 ч	89,48646 (15)
^{169}Yb	32,022 сут	93,61497 (7)
^{153}Sm	46,7 ч	97,43155 (16)
^{183}Ta	5,1 сут	99,08182 (10)
^{182}Ta	115 сут	100,10652 (7)
^{153}Sm	46,7 ч	103,18072 (14)
^{183}Ta	5,1 сут	107,93369 (12)
^{169}Yb	32,022 сут	109,77988 (6)
^{182}Ta	115 сут	113,67244 (20)
^{182}Ta	115 сут	116,4201 (11)
^{169}Yb	32,022 сут	118,18996 (20)
^{152}Eu	13,33 года	121,7824 (3)
^{57}Co	270,9 сут	122,06135 (13)
^{169}Yb	32,022 сут	130,52365 (8)
^{192}Ir	73,83 сут	136,34304 (49)
^{57}Co	270,9 сут	136,47434 (30)
^{183}Ta	5,1 сут	144,12536 (29)
^{182}Ta	115 сут	152,43058 (24)
^{182}Ta	115 сут	156,38740 (29)
^{199}Au	3,139 сут	158,37945 (10)
^{183}Ta	5,1 сут	160,53005 (48)
^{133}Ba	10,5 года	160,609 (25)
^{183}Ta	5,1 сут	161,34799 (9)
^{183}Ta	5,1 сут	162,32522 (28)
^{153}Sm	46,7 ч	172,85407 (15)
^{169}Yb	32,022 сут	177,21417 (9)
^{182}Ta	115 сут	179,39486 (24)
^{169}Yb	32,022 сут	197,95792 (9)
^{182}Ta	115 сут	198,35302 (27)
^{192}Ir	73,83 сут	205,79549 (68)
^{199}Au	3,139 сут	208,20595 (12)

Продолжение табл. 37.2

Нуклид	Период полураспада	E_γ, кэВ
^{183}Ta	5,1 сут	209,87220 (45)
^{182}Ta	115 сут	222,10980 (30)
^{133}Ba	10,5 года	223,116 (35)
^{182}Ta	115 сут	229,32197 (64)
^{228}Th	1,913 года	238,632 (2)
^{183}Ta	5,1 сут	244,26913 (55)
^{152}Eu	13,33 года	244,692 (2)
^{183}Ta	5,1 сут	246,06473 (23)
^{169}Yb	32,022 сут	261,07865 (12)
^{182}Ta	115 сут	264,07542 (30)
^{133}Ba	10,5 года	276,404 (7)
^{203}Hg	46,6 сут	279,1968 (10)
^{183}Ta	5,1 сут	291,73096 (68)
^{152}Eu	13,33 года	295,939 (8)
^{192}Ir	73,83 сут	295,95825 (13)
^{133}Ba	10,5 года	302,858 (5)
^{169}Yb	32,022 сут	307,73766 (13)
^{192}Ir	73,83 сут	308,45689 (15)
^{192}Ir	73,83 сут	316,50789 (18)
^{51}Cr	27,7 сут	320,08419 (42)
^{152}Eu	13,33 года	344,275 (4)
^{183}Ta	5,1 сут	353,99767 (36)
^{133}Ba	10,5 года	356,014 (9)
^{152}Eu	13,33 года	367,789 (5)
^{133}Ba	10,5 года	383,859 (9)
^{152}Eu	13,33 года	411,115 (5)
^{198}Au	2,696 сут	411,80441 (15)
^{108m}Ag	127 лет	433,939 (4)
^{110m}Ag	249,8 сут	446,812 (4)
^{192}Ir	73,83 сут	468,07147 (27)
^{134}Cs	2,062 года	475,36 (5)
^{7}Be	53,44 сут	477,605 (3)
^{192}Ir	73,83 сут	484,57797 (41)
m_0c^2*2	—	511,006 (2)
^{134}Cs	2,062 года	563,27 (5)
^{134}Cs	2,062 года	569,30 (3)
^{152}Eu	13,33 года	586,294 (6)
^{192}Ir	73,83 сут	588,58446 (72)
^{124}Sb	60,2 сут	602,728 (12)
^{192}Ir	73,83 сут	604,41415 (47)
^{134}Cs	2,062 года	604,68 (2)
^{192}Ir	73,83 сут	612,46504 (78)
^{108m}Ag	127 лет	614,281 (6)
^{110m}Ag	249,8 сут	620,358 (3)
^{124}Sb	60,2 сут	645,858 (12)
^{110m}Ag	249,8 сут	657,761 (2)
^{137}Cs	30,0 лет	661,661 (3)
^{110m}Ag	249,8 сут	677,627 (4)
^{110m}Ag	249,8 сут	687,010 (4)
^{152}Eu	13,33 года	688,678 (6)
^{110m}Ag	249,8 сут	706,680 (5)
^{124}Sb	60,2 сут	709,320 (13)
^{124}Sb	60,2 сут	713,793 (13)
^{124}Sb	60,2 сут	722,789 (16)
^{108m}Ag	127 лет	722,938 (8)
^{110m}Ag	249,8 сут	744,279 (5)
^{110m}Ag	249,8 сут	763,949 (5)
^{152}Eu	13,33 года	778,903 (6)
^{124}Sb	60,2 сут	790,727 (16)
^{134}Cs	2,062 года	795,78 (2)
^{134}Cs	2,062 года	801,86 (3)
^{152}Eu	13,33 года	810,459 (7)
^{110m}Ag	249,8 сут	818,032 (5)
^{54}Mn	312,5 сут	834,848 (17)

*1 Интенсивные рентгеновские переходы, возникающие при распаде ядер.

*2 Энергия аннигиляционного излучения, сопровождающего позитронный распад нуклидов.

Продолжение табл. 37.2

Нуклид	Период полураспада	E_γ, кэВ
^{152}Eu	13,33 года	841,586 (8)
^{56}Co	78,76 сут	846,772 (13)
^{152}Eu	13,33 года	867,388 (8)
^{192}Ir	73,83 сут	884,54174 (74)
^{110m}Ag	249,8 сут	884,684 (5)
^{46}Sc	83,83 сут	889,277 (3)
^{88}Y	106,6 сут	898,042 (4)
^{152}Eu	13,33 года	919,401 (8)
^{110m}Ag	249,8 сут	937,491 (5)
^{124}Sb	60,2 сут	968,208 (17)
^{152}Eu	13,33 года	1005,279 (17)
^{56}Co	78,76 сут	1037,840 (15)
^{134}Cs	2,062 года	1038,53 (5)
^{124}Sb	60,2 сут	1045,138 (20)
^{207}Bi	38 лет	1063,662 (4)
^{152}Eu	13,33 года	1085,914 (13)
^{152}Eu	13,33 года	1089,700 (15)
^{152}Eu	13,33 года	1112,116 (17)
^{65}Zn	244,1 сут	1115,546 (4)
^{46}Sc	83,83 сут	1120,545 (4)
^{182}Ta	115 сут	1121,299 (14)
^{182}Ta	115 сут	1157,505 (15)
^{134}Cs	2,062 года	1167,89 (6)
^{60}Co	5,271 года	1173,238 (4)
^{56}Co	78,76 сут	1175,102 (16)
^{182}Ta	115 сут	1189,051 (14)
^{152}Eu	13,33 года	1212,950 (12)
^{182}Ta	115 сут	1221,406 (16)
^{182}Ta	115 сут	1231,019 (16)
^{56}Co	78,76 сут	1238,282 (17)
^{182}Ta	115 сут	1257,421 (16)
^{182}Ta	115 сут	1273,735 (16)
^{22}Na	2,602 года	1274,542 (7)
^{182}Ta	115 сут	1289,158 (16)
^{152}Eu	13,33 года	1299,124 (12)
^{124}Sb	60,2 сут	1325,516 (21)
^{60}Co	5,271 года	1332,501 (5)
^{182}Ta	115 сут	1342,731 (25)
^{56}Co	78,76 сут	1360,25 (7)
^{134}Cs	2,062 года	1365,17 (10)
^{124}Sb	60,2 сут	1368,179 (30)
^{24}Na	15,02 ч	1368,633 (6)
^{182}Ta	115 сут	1373,838 (24)
^{110m}Ag	249,8 сут	1384,300 (4)
^{152}Eu	13,33 года	1408,011 (14)
^{152}Eu	13,33 года	1457,628 (15)
^{110m}Ag	249,8 сут	1475,786 (5)
^{124}Sb	60,2 сут	1488,886 (24)
^{110m}Ag	249,8 сут	1505,036 (5)
^{110m}Ag	249,8 сут	1562,301 (6)
^{124}Sb	60,2 сут	1690,992 (26)
^{207}Bi	38 лет	1770,237 (10)
^{56}Co	78,76 сут	1771,351 (26)
^{88}Y	106,6 сут	1836,063 (13)
^{56}Co	78,76 сут	2015,181 (28)
^{56}Co	78,76 сут	2034,755 (29)
^{124}Sb	60,2 сут	2090,962 (35)
^{56}Co	78,76 сут	2598,458 (33)
^{88}Y	106,6 сут	2734,087 (30)
^{24}Na	15,02 ч	2754,030 (14)
^{56}Co	78,76 сут	3201,962 (46)
^{56}Co	78,76 сут	3253,416 (45)
^{56}Co	78,76 сут	3272,990 (45)
^{56}Co	78,76 сут	3451,152 (47)
^{56}Co	78,76 сут	3547,925 (61)

Таблица 37.3. Энергии и абсолютные интенсивности γ-квантов для некоторых источников, удобных для градуировки детекторов [1, 2, 4]

Нуклид	E_γ, кэВ	I_γ, %/расп.	Нуклид	E_γ, кэВ	I_γ, %/расп.
^{241}Am	26,345 (5)	2,47(7)	^{198}Au	411,80441 (15)	95,47(8)
	59,537 (1)	36,5(2)	^{137}Cs	661,661 (3)	85,4(8)
^{109}Cd	88,0341 (11)	3,75(7)	^{54}Mn	834,848 (17)	99,978(2)
^{57}Co	14,41302 (32)	9,6(3)	^{60}Co	1173,238 (4)	99,87(6)
	122,06135 (13)	85,6 (4)		1332,501 (5)	99,980(9)
	136,47434 (30)	11.1(3)	^{22}Na	1274.542 (7)	99.95(3)
^{199}Au	158,37945 (10)	100*	^{88}Y	898,042 (4)	93,4(7)
	208,20595 (12)	22,1(3)*		1836,063 (13)	99,37(2)
^{203}Hg	279,1968 (10)	81,4(2)		2734,087 (30)	0,72(7)
^{51}Cr	320,08419 (42)	9,83(10)	^{24}Na	1368,633 (6)	99,994(2)
				2754,030 (14)	99,87(2)

* Относительная интенсивность γ-квантов, %.

Таблица 37.4. Эталонные группы α-частиц в диапазоне энергий E_α от 2,5 до 7,7 МэВ [1, 2]

Нуклид	Период полураспада	E_α, МэВ	Относительная интенсивность, %
^{146}Sm	$1{,}03\cdot10^8$ лет	2,470 (6)	100
^{150}Gd	$1{,}79\cdot10^6$ лет	2,719 (8)	100
^{148}Gd	93 года	3,182787 (24)	100
^{232}Th	$14{,}05\cdot10^9$ лет	4,012 (5)	77
		3,953 (8)	23
^{238}U	$4{,}468\cdot10^9$ лет	4,196 (4)	77
		4,149 (5)	23
^{235}U	$7{,}038\cdot10^8$ лет	4,400 (2)	62
		4,368 (3)	18
		4,219 (2)	5,7
^{230}U	$2{,}34\cdot10^7$ лет	4,494 (3)	74
		4,445 (5)	26
^{230}Th	$7{,}54\cdot10^4$ лет	4,6875 (15)	76,3
		4,6210 (15)	23,4
^{234}U	$2{,}45\cdot10^5$ лет	4,7739 (9)	72
		4,7220 (9)	28
^{237}Np [3]	$2{,}14\cdot10^6$ лет	4,787 (2)	51
^{233}U [3]	$1{,}59\cdot10^5$ лет	4,8236 (12)	84
^{241}Pu [3]	14,4 года	4,8960 (15)	83
		4,8530 (15)	12
^{242}Pu [3]	$3{,}76\cdot10^5$ лет	4,900 (2)	74
		4,856 (2)	26
^{231}Pa	32 760 лет	5,0590 (8)	11
		5,0297 (8)	$\leqslant$20
		5,0141 (8)	25,4
		4,9517 (8)	22,8

Продолжение табл. 37.4

Нуклид	Период полураспада	E_α, МэВ	Относительная интенсивность, %
^{239}Pu	24 119 лет	5,1554 (7)	73
		5,1429 (8)	15,1
		5,1046 (8)	11,5
^{240}Pu [3]	6537 лет	5,1677 (7)	76
		5,1233 (7)	24
^{243}Am	7380 лет	5,2754 (10)	88
		5,2335 (10)	10,6
^{210}Po	138,38 сут	5,30451 (7)	100
^{241}Am	432,2 года	5,48560 (12)	85,2
		5,44298 (13)	12,8
^{238}Pu	87,74 года	5,49921 (20)	72
		5,4565 (4)	28
^{244}Cm	18,1 года	5,80496 (5)	76,7
		5,762835 (30)	23,3
^{243}Cm	28,5 года	5,7847 (9)	73
		5,7415 (9)	11
^{250}Cf [3]	13,08 года	6,0308 (6)	85
		5,9891 (6)	15
^{242}Cm [3]	162,8 сут	6,1129 (3)	74
		6,0695 (5)	26
^{252}Cf [3]	2,638 года	6,1183 (5)	84
		6,0757 (5)	16
^{249}Cf [3]	351 год	6,1940 (7)	2
		5,813 (1)	84
		5,760 (1)	4
^{254}Es	275,7 сут	6,4288 (15)	93
^{253}Es	20,47 сут	6,63273 (5)	89,8
		6,5916 (2)	6,6
^{255}Fm [3]	20,07 ч	7,016 (2)	93

Таблица 37.5. Эталонные энергии конверсионных электронов в диапазоне энергий E_e от 25 до 2500 кэВ [2]

Нуклид	Период полураспада	E_e, кэВ	Интенсивность конверсионных электронов, %/расп.
^{199}Au	3,139 сут	34,986 (7)	2,92 (14)
		75,273 (7)	10,9 (5)
		125,099 (7)	6,4 (3)
		143,536 (7)	17,0 (8)
		154,813 (7)	4,38 (19)
^{203}Hg	46,6 сут	193,659 (5)	16,9 (8)
		263,842 (5)	4,35 (13)
		275,485 (5)	1,06 (3)
^{198}Au	2,696 сут	328,7021 (9)	2,87 (9)
		396,9651 (11)	1,02 (3)
^{192}Ir	73,831 сут	217,5634 (8)	1,924 (14)
		230,0621 (8)	1,790 (25)
		238,1131 (8)	4,47 (14)
		302,6280 (5)	1,95 (6)
		389,6767 (8)	1,02 (4)
^{207}Bi	38 лет	481,665 (20)	1,55 (5)
		553,809 (20)	0,435 (13)
		975,615 (20)	7,04 (23)
		1047,759 (20)	1,78 (6)
		1059,769 (20)	0,587 (8)
^{137}Cs	30,0 лет	624,208 (5)	7,64 (55)
^{137m}Ba	2,55 мин	655,660 (5)	1,38 (50)
^{60}Co	5,271 года	1164,906 (4)	~0,015
		1324,170 (5)	~0,011

Продолжение табл. 37.5

Нуклид	Период полураспада	E_e, кэВ	Интенсивность конверсионных электронов, %/расп.
^{212}Bi	60,55 мин	24,510 (5)	—
^{212}Pb	10,64 ч	36,153 (5)	—
^{208}Tl	3,07 мин	148,099 (6)	—
		222,238 (6)	—
		2526,66 (10)	—

Таблица 37.6. Эталонные значения коэффициентов внутренней конверсии [1]

Нуклид	Период полураспада	E_γ, кэВ	Мультипольность перехода	Коэффициент внутренней конверсии I_e/I_γ
^{109}Gd	464 сут	88,0	$E3$	11,2 (2)
^{141}Ce	32,50 сут	145,4	$M1+0{,}4\%\,E2$	0,378 (4)
^{139}Ce	137,66 сут	165,9	$M1$	0,2152 (33)
^{103}Hg	46,60 сут	279,2	$E2+41\%\,M1$	0,164 (2)
^{113}Sn	115,09 сут	391,7	$M4$	0,438 (6)
^{198}Au	2,696 сут	411,8	$E2$	0,0302 (3)
^{137}Cs	30,0 лет	661,7	$M4$	0,0916 (5)
^{58}Co	70,78 сут	810,8	$E2$	0,000295 (10)
^{54}Mn	312,5 сут	834,8	$E2$	0,000224 (10)
^{65}Zn	244,1 сут	1115,5	$M1+16\%\,E2$	0,0001664 (66)

37.3. КВАНТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕР

В табл. 37.7 приведены экспериментально определенные значения спинов I магнитных моментов μ и электрических квадрупольных моментов Q основных и некоторых долгоживущих метастабильных состояний для четно-нечетных, нечетно-четных и нечетно-нечетных ядер. В таблицу не включены четно-четные ядра, у которых значения спинов и магнитных моментов основных состояний равны нулю. Значения I, μ и Q даны в единицах $\hbar$ ($\hbar = h/2\pi$, где h — постоянная Планка), в ядерных магнетонах μ_n и фемтометрах соответственно. Значения спинов, указанные в круглых скобках, получены косвенным путем.

Таблица 37.7. **Спины, магнитные моменты и электрические квадрупольные моменты ядер [1]**

Элемент	Массовое число A	I, $\hbar$	μ, μ_n	Q, фм²
$_1$H	1	1/2	+2,7928456 (11)	—
	2	1	+0,8574376 (4)	+0,2875 (20)
	3	1/2	+2,978960 (1)	—
$_2$He	3	1/2	—2,127624 (1)	—
$_3$Li	6	1	+0,8220467 (6)	—0,0644 (7)
	7	3/2	+3,256424 (2)	—3,66 (3)
	8	2	+1,6532 (8)	2,4 (2)
$_4$Be	9	3/2	—1,778 (9)	+5,3 (3)
$_5$B	8	2	1,0355 (3)	—
	10	3	+1,80065 (1)	+8,472 (56)
	11	3/2	+2,688637 (2)	+4,196
	12	1	+1,00306 (15)	1,71 (16)
	13	3/2	+3,17778 (51)	4,78 (46)
$_6$C	11	3/2	1,027 (10)	3,08 (6)
	13	1/2	+0,702411 (1)	—
$_7$N	12	1	+0,4573 (5)	—
	13	1/2	0,32224 (35)	—
	14	1	+0,4037607 (2)	+1,56
	15	1/2	—0,2831892 (3)	—
$_8$O	15	1/2	0,7189 (8)	—
	17	5/2	—1,89379 (9)	—2,6 (3)
$_9$F	17	5/2	+4,7223 (12)	10 (2)
	19	1/2	+2,628866 (8)	—
	20	2	+2,0935 (9)	7,0 (13)
$_{10}$Ne	19	1/2	—1,887 (1)	—
	21	3/2	—0,661796 (5)	+10,29 (75)
	23	5/2	—1,08 (1)	—
$_{11}$Na	20	2	+0,3694 (2)	—
	21	3/2	+2,38629 (10)	—6,0 (75)
	22	3	+1,746 (3)	—
	23	3/2	+2,217520 (2)	+10,1 (8)
	24	4	+1,6903 (8)	—
	25	5/2	+3,683 (4)	+23 (8)
$_{12}$Mg	25	5/2	—0,85545 (8)	+22
$_{13}$Al	25	5/2	+3,6455 (12)	—
	27	5/2	+3,641504 (2)	+14,0 (2)
	28	3	2,791 (1)	—
$_{14}$Si	29	1/2	—0,55529 (3)	—
$_{15}$P	29	1/2	1,2349 (3)	—
	30	1	—	—
	31	1/2	+1,13160 (3)	—
	32	1	—0,2524 (3)	—
$_{16}$S	31	1/2	0,48793 (8)	—
	33	3/2	+0,643821 (1)	—6,4 (10)
	35	3/2	±1,00	+4,5 (10)
$_{17}$Cl	35	3/2	+0,8218736 (5)	—8,249 (2)
	36	2	+1,28547 (5)	—1,80 (4)
	37	3/2	+0,6841230 (5)	—6,493 (2)
	38	2	2,05 (2)	—
$_{18}$Ar	35	3/2	+0,633 (2)	—
	37	3/2	+0,95 (20)	—
	39	7/2	—1,3 (3)	—
$_{19}$K	36	2	(+) 0,548 (1)	—
	37	3/2	+0,20321 (6)	—
	38	3	+1,3737 (10)	—
	39	3/2	+0,3914658 (4)	+4,9 (4)
	40	4	—1,298099 (3)	—6,7 (8)
	41	3/2	+0,2148699 (2)	+6,0 (5)
	42	2	—1,1425 (6)	—
	43	3/2	0,163 (2)	—
	45	3/2	0,1734 (4)	—

Продолжение табл. 37.7

Элемент	Массовое число A	I, $\hbar$	μ, μ_n	Q, фм²
$_{20}$Ca	39	3/2	1,02168 (12)	—
	41	7/2	—1,594780 (9)	—
	43	7/2	—1,31726 (60)	<23
$_{21}$Sc	41	7/2	5,43 (2)	—
	43	7/2	+4,64 (4)	—26 (6)
	44	2	+2,56 (3)	+10 (5)
	44*m*	6	+3,88	—19 (2)
	45	7/2	4,756483 (3)	—22 (1)
	46	4	+3,03 (2)	+11,9 (6)
	47	7/2	+5,34 (2)	—22 (3)
	48	6	—	—
$_{22}$Ti	45	7/2	0,095 (2)	1,5 (15)
	47	5/2	—0,78848 (1)	+29 (1)
	49	7/2	—1,10417 (1)	+24 (1)
$_{23}$V	47	3/2	—	—
	48	4	1,63 (10)	—
	49	7/2	4,47 (5)	—
	50	6	+3,34745 (3)	7
	51	7/2	+5,1514 (1)	—5,2 (10)
$_{24}$Cr	49	5/2	0,476 (3)	—
	51	7/2	(—)0,934 (5)	—
	53	3/2	—0,47454 (3)	2,2
$_{25}$Mn	51	5/2	3,568 (2)	50 (10)
	52	6	+3,0621 (14)	+60 (8)
	52*m*	2	0,0076	—
	53	7/2	5,024 (7)	—
	54	3	+3,2818 (13)	—
	55	5/2	+3,468716 (2)	+35 (5)
	56	3	+3,2266 (2)	—
$_{26}$Fe	57	1/2	+0,09044 (7)	—
	59	3/2	0,29 (3)	—
$_{27}$Co	55	7/2	+4,822 (3)	—
	56	4	3,830 (15)	—
	57	7/2	+4,733 (17)	+52 (9)
	58	2	+4,044 (8)	+22 (3)
	59	7/2	+4,627 (9)	+40,4 (40)
	60	5	+3,799 (8)	+44 (5)
	60*m*	2	+4,40 (9)	+30 (40)
$_{28}$Ni	57	3/2	0,88 (6)	—
	61	3/2	—0,75002 (4)	+16,2 (15)
	65	5/2	0,69 (6)	—
$_{29}$Cu	60	2	+1,219 (3)	—
	61	3/2	+2,14 (4)	—
	62	1	—0,380 (4)	—
	63	3/2	+2,2233 (2)	—20,9 (3)
	64	1	—0,217 (2)	—
	65	3/2	+2,3817 (3)	—19,5 (4)
	66	1	—0,282 (2)	—
$_{30}$Zn	63	3/2	—0,28164 (5)	+29 (3)
	65	5/2	+0,7690 (2)	—2,3 (2)
	67	5/2	+0,875478 (8)	+15,0 (15)
$_{31}$Ga	67	3/2	+1,8507 (3)	+19,5
	68	1	0,01175 (6)	2,77 (14)
	69	3/2	+2,01659 (4)	+16,8
	71	3/2	+2,56227 (2)	+10,6
	72	3	—0,13224 (2)	+52
$_{32}$Ge	69	5/2	0,735 (7)	2,4 (5)
	71	1/2	+0,547 (5)	—
	73	9/2	—0,8794669 (5)	—17,3 (26)
	75	1/2	+0,510 (5)	—

Продолжение табл. 37.7

Элемент	Массовое число A	I, $\hbar$	μ, μ_n	Q, фм²
$_{33}$As	70	4	2,1 (2)	—
	71	5/2	(+) 1,6735 (18)	—
	72	2	(—) 2,1578 (22)	—
	74	2	—1,597 (3)	—
	75	3/2	+1,43947 (6)	+29
	76	2	—0,906 (5)	—
$_{34}$Se	75	5/2	0,67 (4)	+100
	77	1/2	+0,534270 (8)	—
	79	7/2	—1,018 (15)	+80
$_{35}$Br	76	1	0,5482 (1)	27
	79	3/2	+2,106399 (4)	+29,3
	80	1	0,5140 (6)	19,9 (8)
	80*m*	5	+1,3177 (6)	+76 (3)
	81	3/2	+2,270560 (4)	+27 (2)
	82	5	+1,6270 (5)	+76 (3)
$_{36}$Kr	83	9/2	—0,970669 (3)	+27,0 (13)
	85	9/2	1,005 (2)	+45 (3)
$_{37}$Rb	80	1	—0,0834 (3)	—
	81	3/2	+2,05 (2)	—
	82	5	+1,6434 (12)	—
	83	5/2	+1,43 (2)	+27 (5)
	84	2	—1,297 (11)	+0,50 (13)
	85	5/2	+1,35303 (1)	+27,4 (2)
	86	2	—1,6920 (14)	+20 (3)
	87	3/2	+2,75124 (1)	+13,2 (1)
	88	2	0,508 (5)	—
$_{38}$Sr	87	9/2	—1,09282 (65)	15 (6)
$_{39}$Y	89	1/2	—0,1374153 (3)	—
	90	2	—1,630 (8)	—15,5 (3)
	91	1/2	0,1641 (8)	—
$_{40}$Zr	91	5/2	—1,30362 (2)	—
$_{41}$Nb	90	8	4,941 (4)	—
	93	9/2	+6,1705 (3)	—36 (7)
	95	9/2	6,123 (12)	—
	97	9/2	7,3 (14)	—
$_{42}$Mo	95	5/2	—0,9142 (1)	—1,9 (12)
	97	5/2	—0,9335 (1)	—10,2 (39)
$_{43}$Tc	93	9/2	6,15 (74)	—
	94	7	5,20 (25)	—
	95	9/2	9,058 (140)	—
	96	7	+5,37 (17)	—
	99	9/2	+5,6847 (4)	(+) 34 (34)
$_{44}$Ru	97	5/2	0,687 (27)	—
	99	5/2	—0,6413 (51)	+7,6 (7)
	101	5/2	—0,7188 (60)	+44 (4)
	103	5/2	0,67 (11)	—
	105	(3/2)	<0,3	—
$_{45}$Rh	101*m*	9/2	+5,51 (9)	—
	102	(6)	4,11 (15)	—
	103	1/2	—0,08840 (2)	—
	103*m*	7/2	+4,78 (10)	—
	105	(7/2)	+4,428 (13)	—
$_{46}$Pd	105	5/2	—0,642 (3)	+80 (10)
$_{47}$Ag	102*m*	2	+4,14 (25)	—
	103	7/2	+4,47 (5)	—
	104	5	+4,0 (1)	—
	104*m*	2	+3,7 (2)	—
	105	1/2	0,1014 (10)	—
	106	1	+2,85 (20)	—
	106*m*	6	3,71 (15)	—
	107	1/2	—0,113570 (20)	—
	108	1	+2,6884 (7)	—
	108*m*	6	3,580 (20)	152 (8)

Продолжение табл. 37.7

Элемент	Массовое число A	I, $\hbar$	μ, μ_n	Q, фм²
	109	1/2	—0,1306905 (2)	—
	109*m*	7/2	+4,27 (13)	—
	110	1	2,7271 (8)	—
	110*m*	6	+3,607 (4)	165 (10)
	111	1/2	—0,146 (2)	—
	112	2	0,0547 (5)	—
	113	1/2	0,159 (2)	—
$_{48}$Cd	105	5/2	—0,7393 (2)	+43 (4)
	107	5/2	—0,615055 (1)	+68 (7)
	109	5/2	—0,827846 (2)	+69 (7)
	111	1/2	—0,5948856 (9)	—
	111*m*	11/2	—1,1051 (4)	—85 (9)
	113	1/2	—0,62306 (7)	—
	113*m*	11/2	—1,087783 (2)	—71 (7)
	115	1/2	—0,648425 (1)	—
	115*m*	11/2	—1,041034 (2)	—54 (5)
$_{49}$In	109	9/2	+5,53 (6)	+89
	110	2	+4,365 (4)	+37
	111	9/2	+5,53 (6)	+87
	112	1	+2,82 (3)	+9,3
	113	9/2	+5,5289 (2)	+84,6
	113*m*	1/2	—0,21074 (2)	—
	114	1	+1,7 (4)	—
	114*m*	5	+4,7 (1)	—
	115	9/2	+5,5408 (2)	+86,1 (45)
	115*m*	1/2	—0,24398 (5)	—
	116	1	2,7867 (8)	9 (2)
	116*m*	5	+4,22 (8)	—
	117*m*	1/2	—0,25174 (3)	—
$_{50}$Sn	113	1/2	0,880 (9)	—
	115	1/2	—0,91883 (7)	—
	117	1/2	—1,00104 (7)	—
	119	1/2	—1,04728 (7)	—
	119*m*	11/2	—1,40 (8)	21 (2)
	121	3/2	0,699 (7)	8 (4)
$_{51}$Sb	115	5/2	+3,46 (1)	—20 (4)
	116	3	—	—
	117	5/2	3,43 (6)	—30 (5)
	118	1	2,47 (7)	—
	118*m*	8	2,32 (4)	—
	119	5/2	+3,45 (1)	—21 (4)
	120	1	2,34 (22)	—
	121	5/2	+3,3634 (3)	—20 (3)
	122	2	—1,905 (20)	+47 (3)
	123	7/2	+2,5498 (2)	—26 (4)
	124	3	1,20 (2)	—
	125	7/2	+2,630 (35)	—
	126	(8)	1,28 (7)	—
	127	7/2	2,59 (12)	—
	128	8	1,31 (19)	—
$_{52}$Te	117	1/2	—	—
	119	1/2	0,25 (5)	—
	119*m*	11/2	0,95 (5)	—
	123	1/2	—0,73679 (2)	—
	123*m*	11/2	—1,00 (5)	—
	125	1/2	—0,88828 (3)	—
	125*m*	11/2	—0,93 (5)	—
	127	3/2	0,66 (5)	—
	127*m*	11/2	—0,91 (5)	—
	129	3/2	0,66 (5)	—
	129*m*	11/2	—1,15 (5)	—
	131*m*	11/2	—1,04 (4)	—

Продолжение табл. 37.7

Элемент	Массовое число A	I, $\hbar$	μ, μ_n	Q, фм²
$_{53}$I	125	5/2	3,0 (10)	—88,9
	127	5/2	+2,81327 (8)	—78,9
	129	7/2	+2,6210 (3)	—55,3
	131	7/2	+2,742 (1)	—40 (1)
	132	4	3,088 (7)	9 (1)
	133	7/2	+2,856 (5)	—27 (1)
$_{54}$Xe	129	1/2	—0,777976 (9)	—
	129*m*	11/2	—0,847 (28)	—
	131	3/2	+0,691861 (4)	—12,0 (12)
	131*m*	11/2	—0,80 (10)	—
	133*m*	11/2	—0,87 (12)	—
$_{55}$Cs	125	1/2	+1,41 (2)	—
	127	1/2	+1,46 (2)	—
	129	1/2	+1,482 (9)	—
	130	1	1,4	—
	131	5/2	+3,543 (2)	—62,0 (6)
	132	2	+2,222 (7)	+50,8 (7)
	133	7/2	+2,582023 (9)	—0,3 (1)
	134	4	+2,9937 (9)	+38,9 (3)
	134*m*	8	+1,0978 (2)	—
	135	7/2	+2,7324 (2)	+5,0 (2)
	136	5	+3,711 (15)	22,5 (10)
	137	7/2	+2,8413 (4)	+5,1 (1)
	138	3	0,48 (10)	—
$_{56}$Ba	133	1/2	—0,769 (3)	—
	135	3/2	+0,837943 (17)	+18 (2)
	137	3/2	+0,937365 (20)	+28 (3)
	137*m*	11/2	—	~—5
$_{57}$La	137	7/2	+2,695 (6)	+26 (8)
	138	5	+3,7139 (3)	+51 (9)
	139	7/2	+2,7832 (2)	+22 (3)
	140	3	+0,730 (15)	+10,3 (11)
$_{58}$Ce	137	3/2	0,91 (15)	—
	137*m*	11/2	0,70 (3)	—
	139	3/2	0,96 (20)	—
	141	7/2	0,970 (30)	—
	143	3/2	~1	—
$_{59}$Pr	141	5/2	4,136 (2)	—5,89 (42)
	142	2	+0,234 (1)	+2,97 (85)
	142*m*	5	2.2 (1)	—
	143	7/2	—	—
$_{60}$Nd	143	7/2	—1,065 (5)	—48,4 (20)
	145	7/2	—0,656 (4)	—25,3 (10)
	147	5/2	0,578 (3)	90 (30)
	149	5/2	0,351 (10)	130 (30)
$_{61}$Pm	143	5/2	3,78 (50)	—
	144	5	1,69 (14)	—
	147	7/2	+2,58 (7)	+74 (20)
	148	1	1,84 (19)	+20 (20)
	148*m*	6	1,82 (18)	—
	149	7/2	3,3 (5)	—
	151	5/2	1,8 (2)	190 (30)
$_{62}$Sm	145	7/2	0,92 (6)	—
	147	7/2	—0,8148 (7)	—18 (3)
	149	7/2	—0,6717 (7)	+5,2 (9)
	151	5/2	0,355 (15)	—
	153	3/2	—0,0216 (1)	+100 (10)
	155	3/2	—	90 (10)
$_{63}$Eu	151	5/2	+3,4717 (6)	+115 (9)
	152	3	—1,9414 (13)	+316 (35)
	153	5/2	+1,5330 (8)	+294 (23)
	154	3	2,005 (6)	+390 (50)
	155	5/2	1,93 (26)	—

Продолжение табл. 37.7

Элемент	Массовое число A	I, $\hbar$	μ, μ_n	Q, фм²
$_{64}$Gd	155	3/2	—0,2591 (5)	+159 (16)
	157	3/2	—0,3398 (7)	+203 (26)
	159	3/2	—0,44 (3)	—
$_{65}$Tb	156	3	1,41 (18)	+140 (45)
	157	3/2	2,0 (1)	—
	158	3	+1,758 (7)	+270 (50)
	159	3/2	+2,014 (4)	118 (12)
	160	3	+1,702 (8)	+300 (50)
$_{66}$Dy	153	7/2	—0,72 (9)	—15 (8)
	155	3/2	—0,34 (3)	+94 (10)
	157	3/2	—0,30 (3)	+127 (14)
	161	5/2	—0,4805 (51)	+244 (17)
	163	5/2	+0,6726 (35)	+257 (17)
	165	7/2	0,51	280
$_{67}$Ho	165	7/2	+4,173 (27)	+273 (6)
	166*m*	(7)	4,1 (6)	—
$_{68}$Er	161	3/2	—0,370 (5)	+120 (9)
	163	5/2	+0,57 (2)	+220 (20)
	165	5/2	0,66 (3)	220 (10)
	167	7/2	—0,5665 (24)	+282,7 (12)
	169	1/2	+0,515 (25)	—
	171	5/2	0,70 (5)	240 (20)
$_{69}$Tm	163	1/2	0,081 (2)	—
	165	1/2	0,139 (2)	—
	166	2	0,092 (2)	185 (15)
	167	1/2	—0,197 (2)	—
	169	1/2	—0,235 (3)	—
	170	1	0,2476 (36)	57,4 (9)
	171	1/2	0,2303 (36)	—
$_{70}$Yb	169	7/2	—0,63 (2)	+410 (6)
	171	1/2	+0,49367 (1)	—
	173	5/2	—0,67989 (3)	280 (20)
	175	7/2	0,40 (5)	—
$_{71}$Lu	171	7/2	2,03 (10)	—
	172	4	2,25 (10)	—
	173	7/2	2,34 (9)	—
	174	(1)	1,94 (28)	—
	174*m*	(6)	2,34 (33)	—
	175	7/2	+2,2327 (11)	+568(6)
	176	7	+3,19 (3)	+800 (70)
	176*m*	1	+0,318 (3)	—239 (4)
	177	7/2	+2,239 (11)	+551 (6)
	177*m*	23/2	2,75 (21)	—
$_{72}$Hf	175	5/2	0,70 (10)	+270 (40)
	177	7/2	+0,7935 (6)	+450 (50)
	179	9/2	—0,6409 (13)	+510 (50)
	179m_2	25/2	7,43 (34)	—
	180*m*	8	+8,7 (10)	+440 (50)
$_{73}$Ta	181	7/2	2,371	+390
	182	3	2,6 (2)	—
$_{74}$W	183	1/2	+0,1177847(1)	—
	187	3/2	0,688 (21)	—
$_{75}$Re	181	5/2	3,242 (65)	—
	183	(5/2)	3,03 (11)	—
	184	3	2,499 (51)	—
	184*m*	8	2,86 (13)	—
	185	5/2	+3,1871 (3)	236 (50)
	186	1	+1,739 (3)	~40
	187	5/2	+3,2197 (3)	224 (50)
	188	1	+1,788 (5)	~40
$_{76}$Os	187	1/2	+0,06465184 (6)	—
	189	3/2	0,659933 (4)	+91 (10)
	193	(3/2)	1,30 (19)	—

Продолжение табл. 37.7

Элемент	Массовое число A	I, $\hbar$	μ, μ_n	Q, фм²
$_{77}$Ir	191	3/2	+0,1461 (6)	78 (20)
	191m	11/2	6,026 (36)	—
	192	4	+1,880 (11)	—
	193	3/2	+0,1591 (6)	70 (18)
	194	1	0,37 (4)	—
$_{78}$Pt	195	1/2	+0,60949 (6)	—
	195m	13/2	0,597 (15)	—
	197	1/2	0,51 (2)	—
$_{79}$Au	190	1	0,066	—
	191	3/2	0,138 (7)	—
	192	1	0,0079 (11)	—
	193	3/2	0,140 (7)	—
	194	1	0,074 (4)	—
	195	3/2	0,148 (7)	—
	195m	11/2	6,268 (31)	—
	196	2	+0,5914 (14)	—
	196m_2	12	5,35 (20)	—
	197	3/2	+0,145746 (9)	59,4 (10)
	198	2	+0,5934 (4)	—
	198m	(12)	5,55 (35)	—
	199	3/2	+0,2715 (7)	—
	200m	12	6,10 (20)	—
$_{80}$Hg	181	1/2	+0,5071 (7)	—
	183	1/2	+0,524 (5)	—
	185	1/2	+0,507 (4)	—
	187	3/2	−0,593 (4)	−50 (23)
	191	(3/2)	—	−41 (41)
	193	3/2	−0,62757 (18)	−86 (38)
	193m	13/2	−1,058429 (3)	+108 (10)
	195	1/2	+0,541475 (1)	—
	195m	13/2	−1,044647 (3)	+127 (11)
	197	1/2	+0,5273741 (9)	—
	197m	13/2	−1,027684 (3)	+147 (13)
	199	1/2	+0,5058851 (9)	—
	199m	13/2	−1,014702 (3)	+140 (42)
	201	3/2	−0,560225 (1)	+45,5 (40)
	203	5/2	+0,84895 (13)	+40 (4)
	205	1/2	+0,6010 (1)	—
$_{81}$Tl	194	2	0,14 (1)	—
	195	1/2	+1,58 (4)	—
	196	2	0,07 (1)	—
	197	1/2	+1,58 (2)	—
	198	2	0,00 (1)	—
	198m	7	0,64 (7)	—
	199	1/2	+1,60 (2)	—
	200	2	0,04 (1)	—
	201	1/2	+1,61 (2)	—
	202	2	0,06 (1)	—
	203	1/2	+1,622257 (1)	—
	204	2	0,0908	—
	205	1/2	+1,6382134 (7)	—
$_{82}$Pb	207	1/2	0,58219 (2)	—
$_{83}$Bi	203	9/2	+4,62 (5)	−64 (5)
	204	6	+4,28 (5)	−41 (5)
	205	9/2	4,16 (11)	—
	206	6	+4,59 (5)	−19 (5)
	207	9/2	4,10 (2)	−50 (15)
	209	9/2	+4,1106 (2)	−46
	210	1	−0,0446 (1)	+13 (1)

Продолжение табл. 37.7

Элемент	Массовое число A	I, $\hbar$	μ, μ_n	Q, фм²
$_{84}$Po	205	5/2	∼+0,26	+17
	207	5/2	∼+0,27	+28
	209	1/2	∼+0,77	—
$_{85}$At	211	9/2	—	—
	213	9/2	—	—
$_{89}$Ac	227	3/2	+1,1 (1)	+170 (20)
$_{90}$Th	229	5/2	+0,46 (4)	+430 (90)
$_{91}$Pa	231	3/2	2,01 (2)	—
	233	3/2	+3,5 (8)	−300
$_{92}$U	233	5/2	+0,55	+350
	235	7/2	−0,35	455 (9)
$_{93}$Np	237	5/2	+3,14 (4)	+410 (70)
	238	2	—	—
$_{94}$Pu	239	1/2	+0,203 (4)	—
	241	5/2	−0,683 (15)	+560 (200)
$_{95}$Am	241	5/2	+1,61 (3)	+490
	242	1	+0,3878 (15)	−276
	243	5/2	+1,61 (4)	+490
$_{96}$Cm	243	5/2	0,41	—
	245	7/2	0,5 (1)	—
	247	9/2	0,37	—
$_{97}$Bk	249	7/2	2,0 (4)	+579
$_{99}$Es	253	7/2	4,70 (7)	670 (80)
	254m	2	2,90 (7)	370 (50)

37.4. РАДИОАКТИВНЫЕ РЯДЫ [2]

На рис. 37.1—37.4 представлены соответственно радиоактивные ряды тория, нептуния, урана-радия и урана-актиния. Указаны химический символ элемента, массовое число ядра и его период полураспада. Символы у стрелок указывают тип распада (α, β и. п.). Если нуклид распадается двумя путями, то у стрелок указано относительное ветвление типов распада.

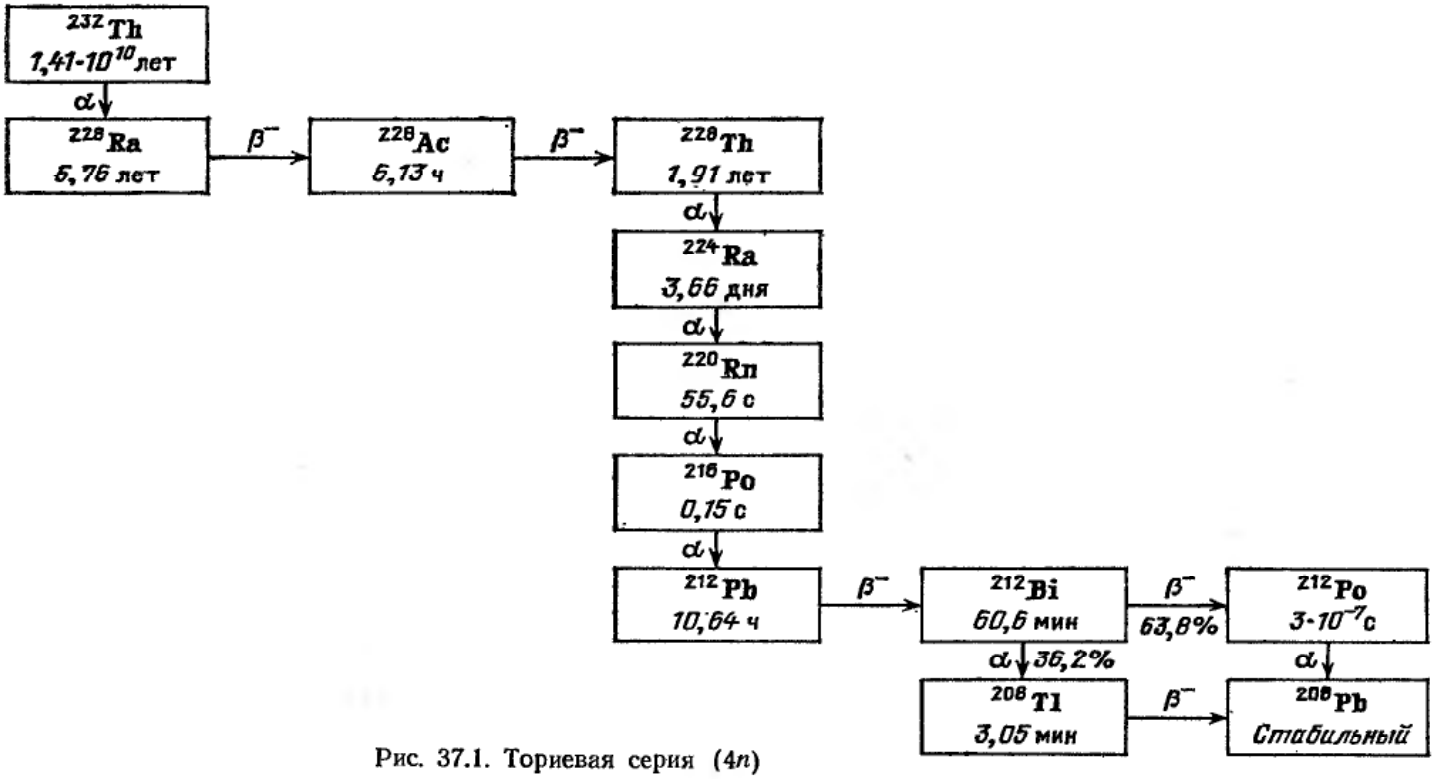


Рис. 37.1. Ториевая серия ($4n$)

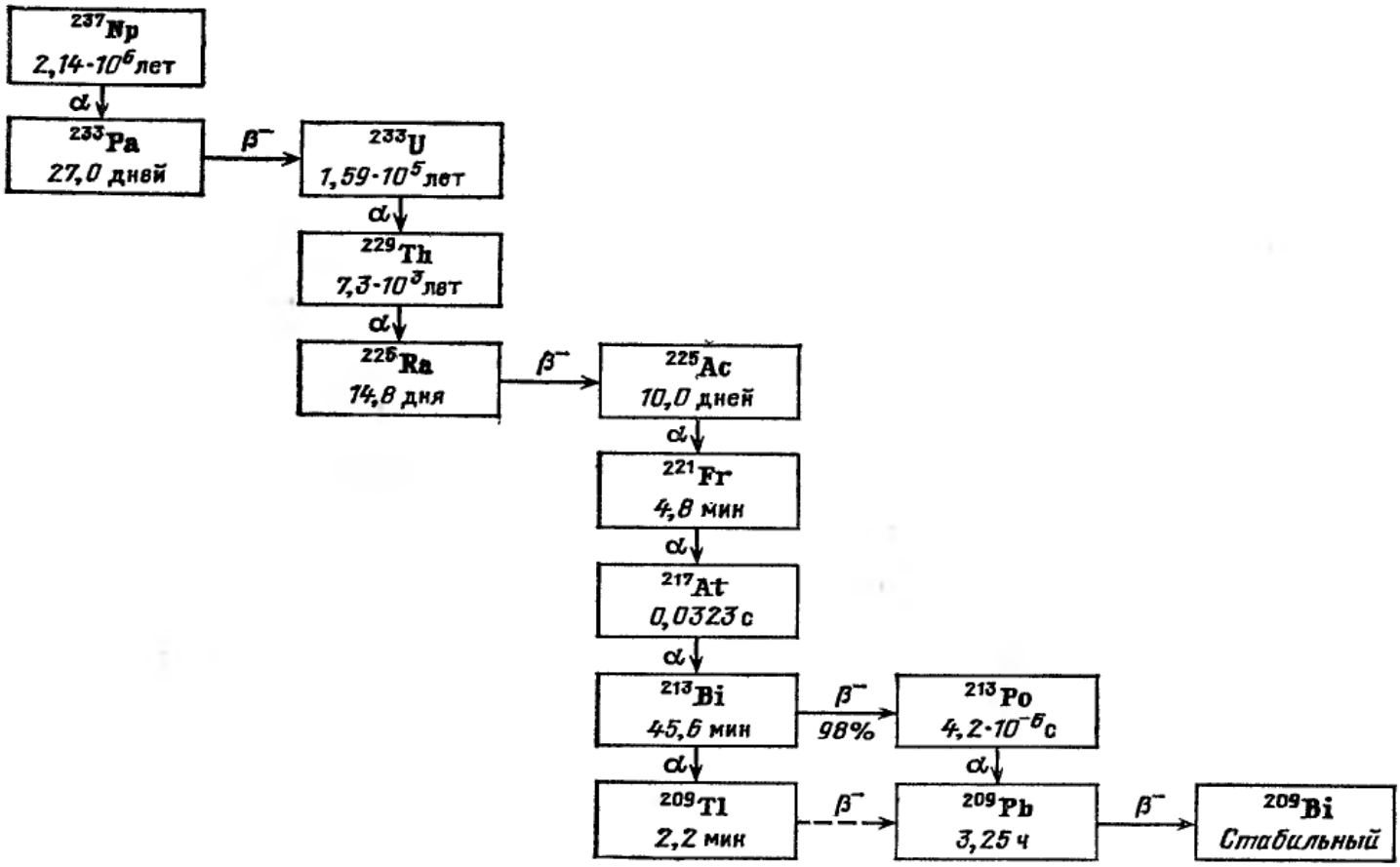


Рис. 37.2. Нептуниевая серия ($4n+1$)

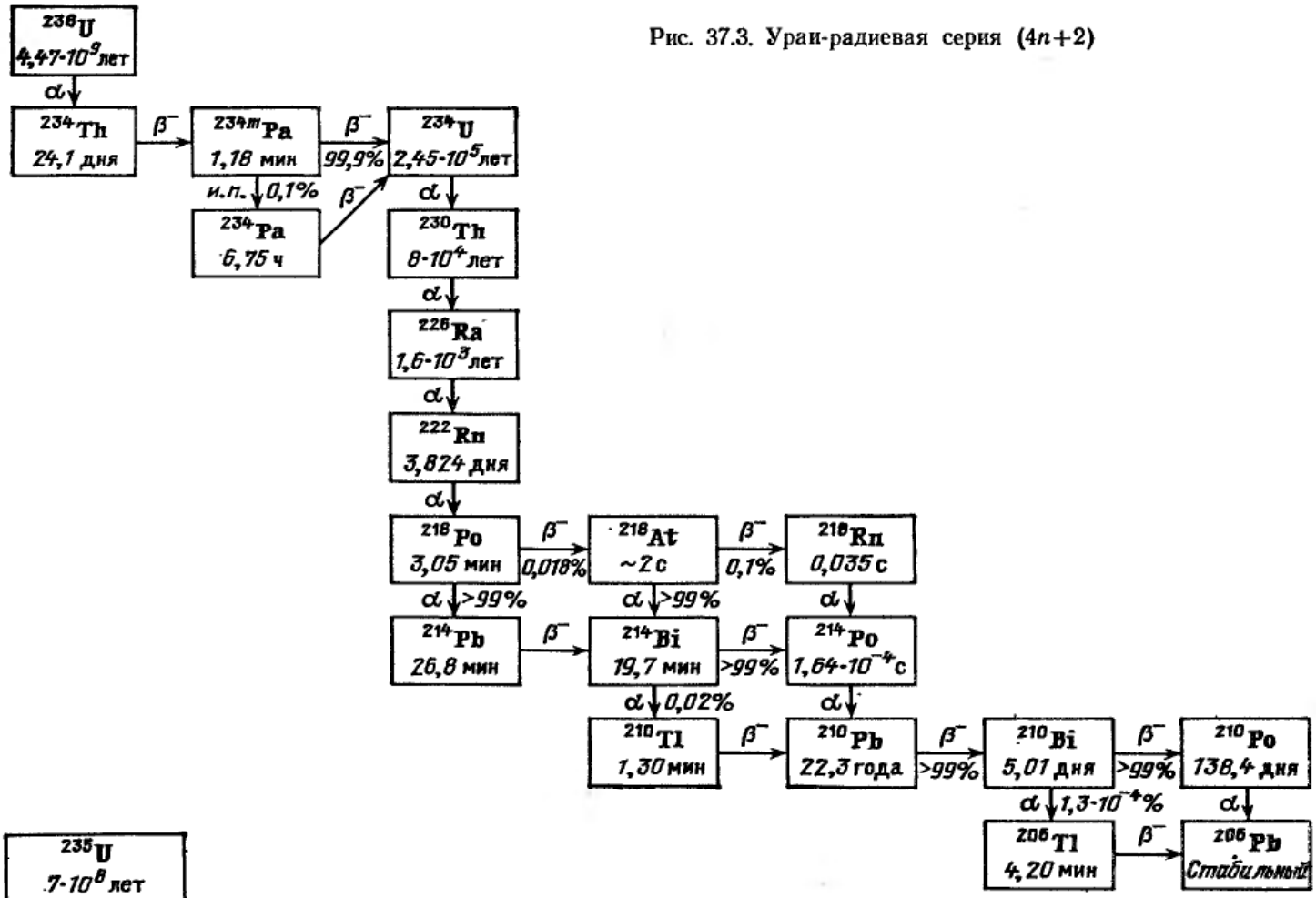


Рис. 37.3. Уран-радиевая серия $(4n+2)$

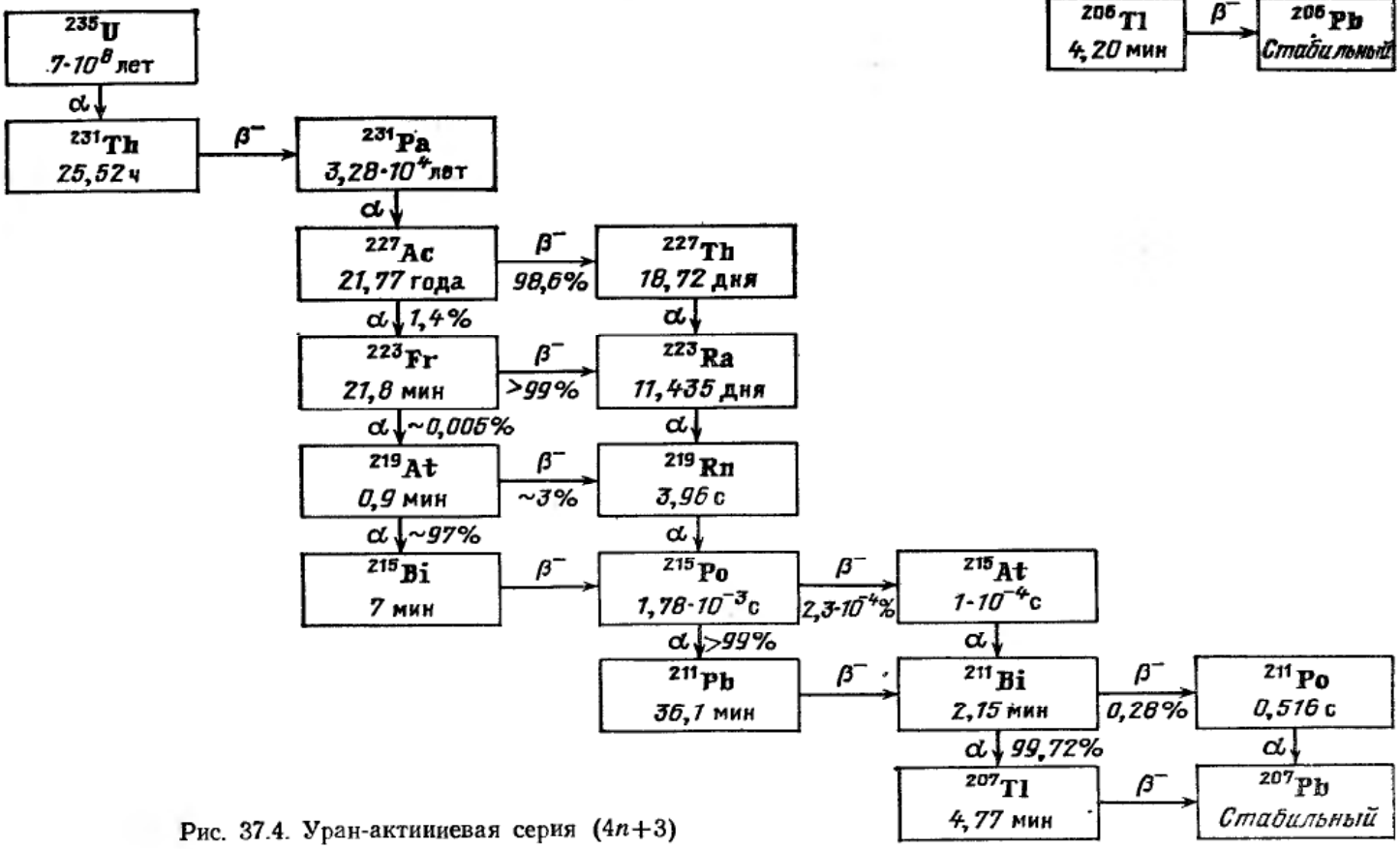


Рис. 37.4. Уран-актиниевая серия $(4n+3)$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Table** of Isotopes. — 7th ed./Ed. by C. M. Lederer and V. S. Shirley. N. Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1978.

2. **Seelmann-Eggebert W., Pfennig G., Münzel H., Klewe-Nebenius H.** Nuklidkarte, 5 Auflage. München: Gerbash und Sohn Verlag, 1981.

3. **Баранов С. А., Кулаков В. М., Шатинский В. М.**// Ядерная физика 1969. Т. 7, вып. 4. С. 724—730; 1971. Т. 14, вып. 5. С. 1101—1102.

4. **Greenwood R. C., Helmer R. G., Gehrke R. J.**// Nucl. Instrum. Methods. 1979. Vol. 159. P. 465.

5. **Holden N. E., Martin R. L., Banes I. L.**//Pure Appl. Chem. 1984. Vol. 56, N 6. P. 675—702.

Глава 38
МЁССБАУЭРОВСКИЕ ЯДРА

С. С. Якимов, В. М. Черепанов

38.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Эффект Мёссбауэра или ядерный гамма-резонанс (ЯГР) — это бесфононное (т. е. без потерн энергии на отдачу) излучение или поглощение резонансных γ-квантов ядрами атомов, находящихся в конденсированной среде.

Высокое энергетическое разрешение ЯГР $\Gamma_0/E_0 \approx 10^{-10} \div 10^{-15}$ ($\Gamma_0=\hbar/\tau$) — естественная ширина ядерного уровня; τ — среднее время жизни возбужденного ядра; $E_0=E_e-E_g$ — энергия γ-перехода между возбужденным e и основным g состояниями ядра) позволяет не только измерять очень малые изменения энергии (порядка 10^{-10} эВ), но и наблюдать сверхтонкую структуру ядерных уровней, вызванную электрическими и магнитными электронно-ядерными взаимодействиями.

Спектр прошедшего через поглотитель излучения, получаемый обычно в ЯГР при относительном (со скоростью v) движении резонансного источника и поглотителя, обусловлен изменением энергии γ-квантов $\Delta E=E-E_0=E_0v/c$ (c — скорость света) в результате эффекта Доплера и определяется выражением

$$\varepsilon(v) = [N(\infty) - N(v)]/[N(\infty) - N_\Phi],$$

где $N(\infty)$ — интенсивность вне резонанса; $N(v)$ — интенсивность при относительной скорости v; N_Φ—не зависящая от v интенсивность фона, определяемая из дополнительного эксперимента. Аналитическое выражение для спектра в случае «тонкого» источника (без самопоглощения) и поглотителя с одиночной линией при условии совпадения в них энергий переходов (см., например, [1]):

$$\varepsilon(v) = f_S \int_{-\infty}^{\infty} F(E)\left\{1 - \exp\left[-f_A n_A \sigma(E)\right]\right\} dE,$$

где $F(E) = [\Gamma_0/2\pi]\{[E - E_0(1 + v/c)]^2 + (\Gamma_0/2)^2\}^{-1}$ — для лоренцевой формы линии излучения источника; f_S, f_A — вероятности излучения и поглощения γ-квантов; n_A, см$^{-2}$ — число ядер резонансного нуклида на 1 см^2; $\sigma = (2\pi c^2\hbar^2/E_0^2)[(E-E_0)^2+(\Gamma_0/2)^2]^{-1}$ — сечение поглощения γ-кванта с энергией E; $\sigma_0 = (2\pi c^2\hbar^2/E_0^2)[(2I_e+1)/(2I_g+1)]/(1+\alpha_T)$ — сечение при $E=E_0$; I_g, I_e — спины ядра в основном и возбужденном состояниях; α_T — полный коэффициент внутренней конверсии.

Максимальное поглощение ε ($v=0$) и площадь спектра S даются выражениями:

$$\varepsilon(0) = f_S\,[1 - \exp(-t_A/2)\,I_0(it_A/2)];$$

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon(v)\,dv = (\pi\Gamma_0/2)\,f_S\,t_A \times$$

$$\times \exp(-t_A/2)\,[I_0(it_A/2) + I_1(it_A/2)],$$

где I_0 и I_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядков от мнимого аргумента; $t_A=f_An_A\sigma(E_0)$ — эффективная толщина поглотителя.

Если источник не тонкий, то при учете самопоглощения в нем формула для $\varepsilon(0)$ приобретает вид [2]:

$$\varepsilon(0) = [f_S/K(t_S)]\,[K(t_S) + K(t_A) - K(t_S + t_A)],$$

где $K(x)=x\exp(-x/2)[I_0(ix/2)+I_1(ix/2)]$; $x=t_S$, t_A, t_S+t_A; $t_S=f_Sn_S\sigma(E_0)$, а площадь спектра не зависит от формы линии излучения.

Основными считаются следующие параметры мёссбауэровских спектров [3—6].

1. *Изомерный (химический) сдвиг* δ *мессбауэровской линии,* обусловленный разностью радиусов ядра в возбужденном и основном состояниях $\Delta R = R_e - R_g$ и разностью плотностей электронов на ядрах поглотителя и источника $|\psi_A(0)|^2$ и $|\psi_S(0)|^2$ соответственно:

$$\delta = A\frac{\Delta R}{R}\left[|\psi_A(0)|^2 - |\psi_S(0)|^2\right],$$

где $A = (4\pi/5)e^2R^2ZS(Z)$; e — элементарный заряд; Z — заряд ядра; $S(Z)$ — зависящий от Z релятивистский множитель, протабулированный в [7].

При различии температур источника и поглотителя возникает дополнительный, так называемый температурный сдвиг линии поглощения в результате релятивистского эффекта Доплера второго порядка по v/c:

$$\delta_T = -E_0\langle v^2\rangle/(2c^2),$$

где $\langle v^2\rangle$ — средняя квадратическая скорость мёссбауэровского атома.

В классическом пределе, справедливом при высоких температурах,

$$\delta_T = -E_0 \cdot 3\ kT/(2\ Mc^2),$$

где k — постоянная Больцмана; T — температура; M — масса атома.

2. *Квадрупольное расщепление* Δ *ядерных уровней,* вызванное взаимодействием квадрупольного момента ядра Q с неоднородным электрическим полем $q = \operatorname{grad} E$, описываемым гамильтонианом

$$\mathcal{H} = \frac{eqQ}{4I\,(2I-1)}\left[3I_z^2 - I\,(I+1)\ \right] + \frac{\eta}{2}\left(I_+^2 - I_-^2\right),$$

где $I_\pm = I_x \pm iI_y$. Он имеет собственные значения

$$E_Q = \frac{eqQ}{4I\,(2I-1)}\left[3m_I^2 - I\,(I+1)\right](1 + \eta^2/3)^{1/2},\ m_I = I,\ I-1,\ \ldots,\ -I.$$

Параметр асимметрии имеет вид $\eta = (V_{xx} - V_{yy})/V_{zz}$, где $|V_{zz}| \geqslant |V_{xx}| \geqslant |V_{yy}|$; $V_{xx} = \partial^2V/\partial x^2$; $V_{yy} = \partial^2V/\partial y^2$; $V_{zz} = \partial^2V/\partial z^2$; V — потенциал электрического поля.

В частном случае аксиально-симметричного градиента поля для ядра ^{57}Fe ($I_g = 1/2$, $I_e = 3/2$) линия расщепляется на дублет с расстоянием между компонентами

$$\Delta = E\,(3/2,\ 3/2) - E\,(3/2,\ 1/2) = eqQ/2,$$

где $q = V_{zz}$ — градиент электрического поля.

3. *Магнитное расщепление ядерных уровней,* вызванное сверхтонким взаимодействием дипольного магнитного момента ядра $\vec{\mu}$ с магнитным полем на ядре H_n, которое создается электронами собственного атома и магнитными моментами соседних атомов, а также поляризованными электронами проводимости [3—6].

Магнитное взаимодействие приводит к полному снятию вырождения ядерных уровней, положения которых выражаются формулой

$$E_{m_I} = -\mu_n H_n\, m_I\ /I,$$

где μ_n — ядерный магнетон; m_I — магнитное квантовое число (правила отбора для магнитных дипольных переходов $\Delta m_I = 0, \pm 1$).

Расстояние между соседними эквидистантными подуровнями $\Delta E_m = g\mu_n H_n$, где g — гиромагнитное отношение (ядерный g-фактор).

При добавлении к магнитному дипольному электрического квадрупольного взаимодействия эквидистантность подуровней нарушается. Для $\Delta \ll \Delta E_m$ положения ядерных подуровней определяются соотношением:

$$E = -\mu_n H_n m_I\ /\ I + (-1)^{|m_I| + 1/2}\ eqQ\,(3\cos^2\theta - 1)/8,$$

где θ — угол между осью z градиента электрического поля и направлением магнитного поля.

38.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕССБАУЭРОВСКИХ ЯДЕР

В табл. 38.1 приведены следующие характеристики мёссбауэровских ядер [8, 9]:

символ изотопа с массовым числом;

содержание мёссбауэровского изотопа в естественной смеси;

E_0 — энергия мёссбауэровского перехода;

$T_{1/2}$ — период полураспада резонансного уровня;

Γ — минимальная наблюдаемая ширина линии, определяемая по формуле $\Gamma = 2\ln 2(\hbar/T_{1/2})$;

E_R — энергия отдачи свободного ядра;

α_T — полный коэффициент внутренней конверсии;

σ_0 — полное сечение резонансного поглощения;

I_g, I_e — значения спина основного и возбужденного состояний ядра;

μ_g, μ_e — значения магнитного момента основного и возбужденного состояний ядра (в ядерных магнетонах):

Q_g, Q_e — значения квадрупольного момента основного и возбужденного состояний ядра;

сведения о материнских изотопах мёссбауэровского ядра (массовое число, тип распада, период полураспада, э. з. — электронный захват).

Таблица 38.1. **Значения характеристик мессбауэровских ядер**

Ядро	Содержание, %	E, кэВ	$T_{1/2}$, нс	Γ, мм/с	E_R, 10^{-3} эВ	α_T	σ_0, 10^{-20} см^2	I_g	I_e	μ_g	μ_e	Q_g, 10^{-24} см^2	Q_e, 10^{-24} см^2	Сведения о материнском ядре
^{40}K	0,012	29,56	4,25	2,177	11,73	0,35	28,65	4^-	3^-	−1,298	—	−0,093	—	^{39}K (n, γ) (d, p)
^{54}Fe	2,14	14,413	97,81	0,194	1,956	8,21	255,8	$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	0,09060	−0,1553	0	+0,2	^{57}Co (э. з., 270 сут), ^{57}Mn (β$^-$, 1,6 млн)
^{57}Fe	2,14	136,48	8,7	0,230	175,4	0,14	34,50	$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	0,09060	−0,9785	0	—	—
^{61}Ni	1,19	67,408	5,27	0,770	39,98	0,13	71,16	$\frac{3^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	−0,7498	+0,478	+0,162	−0,20	^{61}Co (β$^-$, 99 мин), ^{61}Cu (э. з., 3,41 ч)
^{67}Zn	4,11	93,317	9150	$32\cdot10^{-5}$	69,77	0,89	4,955	$\frac{5^-}{2}$	$\frac{1^-}{2}$	+0,8755	+0,578	0	—	^{67}Ga (э. з., 78 ч), ^{67}Cu (β$^-$, 59 ч)
^{73}Ge	7,76	13,263	2953	0,007	1,293	1095	0,761	$\frac{9^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	−0,8792	−0,941	−0,18	—	^{73}As (э. з., 80,3 сут), ^{73}Ga (β$^-$, 4,9 ч)
^{73}Ge	7,76	68,752	1,86	2,139	34,76	0,8	22,88	$\frac{9^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	—	—	—	—	—
^{83}Kr	11,55	9,40	147	0,198	0,571	19,6	107,5	$\frac{9^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	−0,9703	−0,942	+0,253	+0,43	^{83}Br (β$^-$, 2,39 ч), ^{83}Rb (э. з, 86,2 сут)
^{99}Tc	0	140,51	0,237	8,215	107,1	0,15	8,621	$\frac{9^-}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	+5,6807	+3,7	+0,34	—	^{99}Mo (β$^-$, 6,7 ч)
^{99}Ru	12,72	89,36	20,5	0,149	43,30	1,5	8,042	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−0,638	−0,28	+0,12	+0,34	^{99}Rh (э. з., 16,1 сут), ^{99m}Rh (э. з., 4,7 ч)
^{101}Ru	17,07	127,22	0,581	3,701	86,02	0,16	8,688	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−0,68	−0,31	—	—	^{101}Rh (э. з., 3 года), ^{101}Tc (β$^-$, 14,0 мин)
^{107}Ag	51,4	93,1	$44,3\cdot10^9$	$6,6\cdot10^{-11}$	43,4	20	5,3	$\frac{1^-}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	−0,1136	—	0	—	^{107}Cd (э. з., 6,6 ч), ^{107}Pd (β$^-$, $7\cdot10^6$ лет)
^{117}Sn	7,61	158,53	0,277	6,230	115,3	0,159	16,80	$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	+1,0001	—	0	—	^{117}Sb (э. з., 2,8 ч), ^{117m}In (β$^-$, 1,93 ч)
^{119}Sn	8,58	23,871	17,86	0,642	2,570	5,1	140,3	$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−1,0461	+0,633	0	−0,064	^{119m}Sn (245 сут), ^{119}Sb (э. з.,38 ч)
^{121}Sb	57,25	37,138	3,5	2,105	6,118	11,1	19,55	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	+3.3591	+2,47	−0,28	−0,38	^{121m}Sn (β$^-$, 50 лет)
^{125}Te	6,99	35.492	1,481	5,204	5,409	13,6	26,51	$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−0,8872	+0,60	0	−0,20	^{125}Sb (β$^-$, 2,7 лет), ^{125}I (э. з., 60 сут)

^{127}I	100	57.60	1,95	2,435	14,02	3,78	20,57	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	+2,8091	+2,54	—0,79	+0,70	^{127m}Te (β⁻, 109 сут), ^{127}Xe (э. з., 36,4 сут)
^{129}I	0	27,77	16,80	0,586	3,209	5,1	39,01	$\frac{7^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	+2,6174	+2,797	—0,55	—0,68	^{129m}Te (β⁻, 34 сут)
^{129}Xe	26,44	39,581	1,01	6,843	6,519	12,3	23,48	$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	—0,7768	+0,68	0	—0,41	^{129}I (β⁻, $1{,}57\cdot10^7$ лет), ^{129}Cs (э. з., 2,2 ч)
^{131}Xe	21,18	80,183	0,500	6,823	26,34	1,6	7,403	$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,6908	—	—0,12	0	^{131}I (β⁻, 8,05 сут)
^{133}Cs	100	80,997	6,313	0,535	26,48	1,72	10,28	$\frac{7^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	—2,5786	+3,44	—0,003		^{133}Ba (э. з., 10,5 лет), ^{133}Xe (β⁻, 5,29 сут)
^{133}Ba	0	12,29	8,10	2.748	0,610	—	29,18	$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	—	—	0	—	^{133m}Ba (38,9 ч)
^{139}La	99,91	165,85	1,50	1,100	106,2	0,26	5,282	$\frac{7^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	+2,7781	—	+0,21	—	^{139}Ba (β⁻, 84,9 мин), ^{139}Ce (э. з., 140 сут)
^{141}Pr	100	145,42	1,85	1,017	80.50	0,46	10,57	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	+4,162	+2,80	—0,059	+0,3	^{141}Ce (β⁻, 32,5 сут), ^{141}Nd (э. з., 2,5 ч)
^{145}Nd	8,30	67,25	29,4	0,138	16,74	6,1	3,810	$\frac{7^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	—0,654	—0,320	—0,254	—	^{145}Pm (э. з., 17,7 года), ^{145}Pr (β⁻, 5,98 ч)
^{145}Nd	8,30	72,50	0,72	5,241	19,46	4,9	5,917	$\frac{7^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	—0,654	—0,32	—0,254	—	—
^{145}Pm	0	61,25	2,62	1,705	13,89	6,42	11,72	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	—	—	—	—	^{145}Sm (э. з., 340 сут)
^{147}Pm	0	91,03	2,57	1,169	30,26	—	6.920	$\frac{7^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	+2,62	+3,60	+0,71	+0,6	^{147}Nd (β⁻, 11,1 сут)
^{147}Sm	14,97	122.1	0,80	2,801	54,44	—	6,154	$\frac{7}{2}$	$\frac{5}{2}$	—	—	—	—	
^{149}Sm	13,83	22,494	7,12	1,708	1,823	50	7,111	$\frac{7^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	—0,670	—0,623	+0,058	+0,50	^{149}Eu (э. з., 93 сут), ^{149}Pm (β⁻, 53 ч)
^{151}Sm	0	65,83	20	0.208	15,40	—	8,352	—	—	—	—	—	—	—
^{152}Sm	26,72	121,78	1,41	1,593	52,37	1,17	38,01	0^+	2^+	0	+0,58	0	—1,6	^{152}Eu (э. з., 12 лет), ^{152}Pm (β⁻, 6 мес)
^{153}Sm	0	35,842	2,0	3,816	4.507	—	146,5	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}$	—	—	—	—	—
^{154}Sm	22,71	81,99	3,0	1,112	23,43	—	30,08	0^+	2^+	0	+0,79	0	—	Кулоновское возбуждение

Продолжение табл. 38.1

Ядро	Содержание, %	E, кэВ	$T_{1/2}$, нс	Γ, мм/с	E_R, 10^{-3} эВ	$^{\varkappa}T$	σ_0, 10^{-20} см²	I_g	I_e	μ_g	μ_e	Q_g, 10^{-24} см²	Q_e, 10^{-24} см²	Сведения о материнском ядре
^{151}Eu	47,82	21,532	9,7	1,310	1,648	28,6	23,77	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	+3,465	+2,587	+1,14	+1,49	^{151}Gd (э. з., 120 сут), ^{153}Sm (β⁻, 90 лет)
^{153}Eu	52,18	83,365	0,82	4,002	24,38	3,82	9,738	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^-}{2}$	+1,5249	+1,80	+2,8	—	^{153}Sm (β⁻, 46,7 ч), ^{153}Gd (э. з., 242 сут)
^{153}Eu	52,18	97,429	0,21	13,37	33,30	0,42	17,97	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+1,5249	+0,793	+2,9	—	—
^{153}Eu	52,18	103,18	3,9	0,680	37,35	1,78	5,456	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	+1,5249	+2,04	+2,9	+1,5	—
^{154}Gd	2,15	123,07	1,17	1,900	52,79	1,2	36,71	0^+	2^+	0	0,85	0	—	^{154}Eu (β⁻, 16 лет)
^{155}Gd	14,73	60,01	0,194	23,49	12,47	8,72	10,48	$\frac{3^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	−0,2584	—	+1,6	—	^{155}Eu (β⁻, 4,96 года), ^{155}Tb (э. з., 5,6 сут)
^{155}Gd	14,73	86,545	6,33	0,499	25,94	0,43	33,92	$\frac{3^-}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	−0,2584	−0,528	+1,6	+0,32	—
^{155}Gd	14,73	105,31	1,168	2,224	38,41	0,26	16,46	$\frac{3^-}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−0,2584	—	+1,6	+1,6	—
^{156}Gd	20,47	88,966	2,17	1,417	27,23	3,9	31,35	0^+	2^+	0	+0,778	0	−2,1	^{156}Eu (β⁻, 15 сут), ^{156}Tb (э. з., 5,4 сут)
^{157}Gd	15,68	54,54	0,187	26,82	10,17	11,9	9,586	$\frac{3^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	−0,3388	−0,513	2,0	3,6	^{157}Eu (β⁻, 15,2 ч)
^{157}Gd	15,68	64,0	460	$9,3\cdot10^{-3}$	14,00	0,97	23,19	$\frac{3^-}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	−0,3388	−0,513	2,0	3,6	—
^{158}Gd	24,87	79,51	2,54	1,355	21,48	—	27,56	0^+	2^+	0	+0,77	0	+1,5	^{157}Gd (n, γ)
^{160}Gd	21,90	75,26	2,7	1,346	19,00	—	25,65	0^+	2^+	0	+0,61	0	+1,6	—
^{159}Tb	100	57,995	0,105	44,92	11,35	9,36	10,53	$\frac{3^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	+2,008	+1,606	+1,3	—	^{159}Gd (β⁻, 18,6 ч), ^{159}Dy (э. з., 144,4 сут)
^{160}Dy	2,29	86,788	2,037	1,547	25,27	4,5	29,42	0^+	2^+	0	+0,724	0	1,7	^{160}Tb (β⁻, 72,1 сут)
^{161}Dy	18,88	25,655	28,2	0,378	2,194	2,9	95,31	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^-}{2}$	−0,479	+0,584	+2,3	+2,3	^{161}Tb (β⁻, 6,9 сут), ^{161}Ho (э, з., 2,45 ч)
^{161}Dy	18,88	43,83	0,78	8,002	6,405	4,32	31,92	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	−0,479	−0,140	+2,35	+0,5	—
^{161}Dy	18,88	74,577	3,31	1,108	18,54	0,65	6,754	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	−0,479	−0,391	+2,3	+1,4	—
^{162}Dy	25,53	80,65	2,27	1,494	21,55	—	121,3	0^+	2^+	0	+0,74	0	—	^{161}Dy (n, γ)

^{164}Dy	28,18	73,392	2,39	1,560	17,63	—	22,05	0^+	2^+	0	+0,84	0	−1,12	^{164}Ho (э. з., 37 мин)
^{165}Ho	100	94,699	0,022	130,1	29,17	3,1	8,277	$\frac{7^-}{2}$	$\frac{9^-}{2}$	+4,12	+4,12	+2,4	+2,6	^{165}Dy (β^-, 2,33 ч)
^{164}Er	1,56	91,39	1,47	2,036	27,34	—	28,27	0^+	2^+	0	+0,7	0	—	^{164}Ho (β^-, 37 мин)
^{166}Er	33,41	80,557	1,87	1,816	20,98	6,93	23,77	0^+	2^+	0	+0,63	0	−1,6	^{166}Ho (β^-, 26,9 ч), ^{166}Tm (э. з., 7,7 ч)
^{167}Er	22,94	79,322	0,119	29,0	20,22	5,74	7,211	$\frac{7^+}{2}$	$\frac{9^+}{2}$	0,564	—	2,83	—	^{167}Tm (э. з., 9,6 сут), ^{167}Ho (β^-, 3,1 ч)
^{168}Er	27,07	79,80	1,88	1,823	20,35	—	23,60	0^+	2^+	0	+0,66	0	—	^{168}Tm (э. з., 85 сут)
^{170}Er	14,88	79,31	1,9	1,815	19,86	—	23,35	0^+	2^+	0	+0,62	0	—	Кулоновское возбуждение
^{169}Tm	100	8,401	4,0	8,141	0,224	291	23,74	$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−0,231	+0,534	0	−1,2	^{169}Er (β^-, 9,4 сут), ^{169}Yb (э. з., 32 сут)
^{170}Yb	3,03	84,253	1,608	2,019	22,41	6,12	24,20	0^+	2^+	0	+0,67	0	−2,1	^{170}Tm (β^-, 128,6 сут), ^{170}Lu (β^+, 2,0 сут)
^{171}Yb	14,31	66,719	0,87	4,713	13,97	13	7,852	$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,4919	+0,348	0	−1,59	^{171}Tm (β^-, 1,92 года), ^{171}Lu (э. з., 8,2 сут)
^{171}Yb	14,31	75,875	1,64	2,198	18,07	7,8	14,44	$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+0,4919	+1,008	0	−2,21	—
^{172}Yb	21,82	78,69	1,80	1,931	19,32	8,5	20,79	0^+	2^+	0	+0,664	0	−2,16	^{172}Lu (э. з., 6,7 сут), ^{172}Tm (β^-, 63,6 ч)
^{174}Yb	31,84	76,469	1,76	2,033	18,04	9,4	20,10	0^+	2^+	0	+0,672	0	−2,14	^{174}Lu (э. з., 3,6 года), ^{174m}Tm (β^-, 5,2 мин)
^{176}Yb	12,73	82,13	2,0	1,665	20,57	7,1	22,47	0^+	2^+	0	+0,74	0	−2,24	Кулоновское возбуждение
^{175}Lu	97,41	113,80	0,100	24,04	39,72	2,51	6,728	$\frac{7^+}{2}$	$\frac{9^+}{2}$	+2,22	+4,26	+5,68	—	^{175}Yb (β^-, 4,19 сут), ^{175}Hf (э. з., 70 сут)
^{176}Hf	5,20	88,361	1,39	2,227	23,81	—	22,84	0^+	2^+	0	—	0	—	^{176m}Lu (β^-, 3,7 ч)
^{177}Hf	18,50	112,97	0,5	4,843	38,70	—	5,991	$\frac{7^-}{2}$	$\frac{9^-}{2}$	+0,61	+1,0	—	—	^{177}Lu (β^-, 6,7 сут)
^{178}Hf	27,14	93,174	1,495	1,964	26,18	4,6	25,16	0^+	2^+	0	+0,52	0	−1,95	^{178}Lu (β^-, 28,4 мин), ^{178}Ta (э. з., 9,31 мин)
^{180}Hf	35,24	93,332	1,50	1,954	25,98	4,7	24,59	0^+	2^+	0	+0,63	0	−1,96	^{180m}Ta (э. з., 8,1 ч), ^{180m}Hf (140 сут)
^{181}Ta	99,99	6,238	6800	0,0064	0,115	80	94,69	$\frac{7^+}{2}$	$\frac{9^-}{2}$	+2,356	+5,14	+3,9	+4,4	^{181}W (э. з., 121,2 сут), ^{181}Hf (β^-, 42,4 сут)
^{181}Ta	99,99	136,25	0,040	50,19	55,05	1,76	5,969	$\frac{7^+}{2}$	$\frac{9^+}{2}$	+2,356	—	+3,9	—	—

Продолжение табл. 38.1

Ядро	Содержание, %	E, кэВ	$T_{1/2}$, нс	Γ, мм/с	E_R, 10^{-3} эВ	α_T	σ_0, 10^{-23} см²	I_g	I_e	μ_g	μ_e	Q_g, 10^{-24} см²	Q_e, 10^{-24} см²	Сведения о материнском ядре
^{180}W	0,14	103,70	1,27	2,077	32,07	3,4	25,62	0^+	2^+	0	+0,52	0	−1,82	^{180m}Ta (β⁻, 8,1 ч), ^{180}Re (э. з., 2,43 мин)
^{182}W	26,41	100,10	1,31	2,086	29,55	3,85	25,17	0^+	2^+	0	+0,51	0	−1,81	^{182}Ta (β⁻, 115 сут)
^{183}W	14,40	46,484	0,184	31,98	6,338	40	5,523	$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,12	−0,10	0	−1,5	^{183}Ta (β⁻, 5,1 сут), ^{183}Re (э. з., 71 сут)
^{183}W	14,40	99,079	0,688	4,013	28,79	4,1	8,178	$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+0,12	+0,92	0	−1,63	—
^{184}W	30,64	111,21	1.28	1,922	36,08	2,6	27,40	0^+	2^+	0	+0.58	0	−1.71	^{184}Re (э. з., 38 сут), ^{184}Ta (β⁻, 8,7 ч)
^{186}W	28,41	122.30	1,01	2,215	43,17	1,6	31,46	0^+	2^+	0	+0.634	0	−1.63	^{186}Re (э. з., 90 ч), ^{186}Ta (β⁻, 10 мин)
^{187}Re	62,93	134,24	0.010	203.8	51,73	2,266	5.542	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	+3,200	—	+2,2	—	^{187}W (β⁻, 23,9 ч)
^{186}Os	1,59	137,16	0,84	2,374	54,29	1,3	28,40	0^+	2^+	0	+0.56	0	−1.5	^{186}Re (β⁻, 90 ч)
^{188}Os	13,30	155,03	0,695	2,539	68,62	0,8	27,96	0^+	2^+	0	+0,58	0	−1,36	^{188}Re (β⁻, 16,8 ч), ^{188}Ir (э. з., 41 ч)
^{189}Os	16,10	36,22	0,50	15,11	3,726	80	1,151	$\frac{3^-}{2}$	$\frac{1^-}{2}$	+0,6565	+0,22	+0,94	0	^{189}Ir (э. з., 13,3 сут), ^{189}Re (β⁻, 24,3 ч)
^{189}Os	16,10	69,59	1,64	2,397	13,75	8,0	8,420	$\frac{3^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+0,6565	+0,98	+0,94	−0,62	—
^{189}Os	16,10	95.23	0.23	12,49	25,76	6,7	0,561	$\frac{3^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,6565	—	+0,94	0	—
^{190}Os	26,40	186,90	0,47	3,114	98,69	0,4	24,66	0^+	2^+	0	+0,63	0	−1,18	^{190}Ir (э. з., 12,1 сут), ^{190}Re (β⁻, 3,1 мин)
^{191}Ir	37,30	82,398	4,02	0,826	19,08	10,7	1,540	$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,1453	+0,54	+0,78	0	^{191}Os (β⁻, 15,4 сут), ^{191}Pt (э. з., 2,8 сут)
^{191}Ir	37,30	129,40	0,089	23,75	47,06	2,88	5,649	$\frac{3^+}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+0.1453	+0.55	+0.78	—	—

^{193}Ir	62,70	73,039	6,30	0,594	14,84	6,5	3,057	$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,1583	+0,486	+0,7	0	^{193}Os (β^-, 30,0 ч)
^{193}Ir	62,70	138,95	0,080	24,61	54,00	2,26	5,831	$\frac{3^+}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+0,1583	—	+0,7	—	—
^{195}Pt	33,80	98,857	0,170	16,28	26,90	7,2	6,106	$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,6060	−0,62	0	—	^{195}Au (э. з., 183 сут), ^{195} Ir (β^-, 2,8 ч)
^{195}Pt	33,80	129,74	0,620	3,401	46,33	1,8	7,426	$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+0,6060	+0,90	0	—	—
^{197}Au	100	77,345	1,879	1,883	16,30	4,30	3,858	$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,1448	+0,418	+0,59	0	^{197}Pt (β^-, 18,3 ч), ^{197}Hg (э. з., 64,1 ч)
^{199}Hg	16,84	158,37	2,47	0,699	67,65	0,94	15,08	$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+0,506	+1,28	0	+0,7	^{199}Au (β^-, 3,14 сут), ^{199}Tl (э. з., 7,42 ч)
^{201}Hg	13,22	32,19	0,20	42,49	2,767	—	0,948	$\frac{3^-}{2}$	$\frac{1^-}{2}$	—	—	—	0	^{201}Tl (э. з., 73 ч)
^{232}Th	0	49,369	0,345	16,06	5,639	319	1,568	0^+	2^+	—	—	—	—	^{236}U (α, $2{,}4\cdot10^7$ лет)
^{231}Pa	0	84,24	41,0	0,079	16,49	1,83	4,751	$\frac{3^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+1,98	—	−1,7	+0,8	^{231}Th (β^-, 25,5 ч)
^{234}U	0,0057	43,491	0,266	23,65	4,339	780	0,828	0^+	2^+	—	—	—	−2,39	^{234m}Pa (β^-, 1,17 мин), ^{234}Np (э. з., 4,4 сут)
^{236}U	0	45,242	0,235	25,73	4,655	845	0,706	0^+	2^+	—	—	—	2,96	^{236}Np (э. з., 22 ч)
^{238}U	99,27	44,915	0,225	27,07	4,550	660	0,917	0^+	2^+	—	+0,25	+10,5	−3,2	^{242}Pu (α, $3{,}79\cdot10^5$ лет)
^{237}Np	0	59,537	68,3	0,067	8,028	1,12	30,60	$\frac{5^+}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+2,5	+1,3	+4,1	+4,1	^{241}Am (α, 458 лет), ^{237}Pu (э. з., 44,63 сут)
^{239}Pu	0	57,26	0,101	47,30	7,364	223	0,770	$\frac{1^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	+0,200	—	—	—	^{243}Cm (α, 30 лет), ^{239}Np (β^-, 2,36 сут)
^{240}Pu	0	42,824	0,162	39,00	4,100	920	0,724	0^+	2^+	—	+0,78	—	−3,3	^{244}Cm (α, 18,1 года), ^{240}Np (β^-, 63 мин)
^{243}Am	0	84,0	2,34	1,392	15,59	0,218	27,61	$\frac{5^-}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	+1,58	—	+4,9	+4,9	^{243}Pu (β^-, 4,96 ч), ^{247}Bk (α, 2,34 нс)

38.3. ПАРАМЕТРЫ МЁССБАУЭРОВСКИХ СПЕКТРОВ

В табл. 38.2 приведены для температур 298 и 4,2 К положения линий (мм/с) спектра α-Fe относительно источника Pd(^{57}Co) при температуре 298К, а также параметры δ, мм/с, B_n, Тл [10], на рис. 38.1 — мёссбауэровские спектры поглощения для ядер ^{57}Fe в различных материалах.

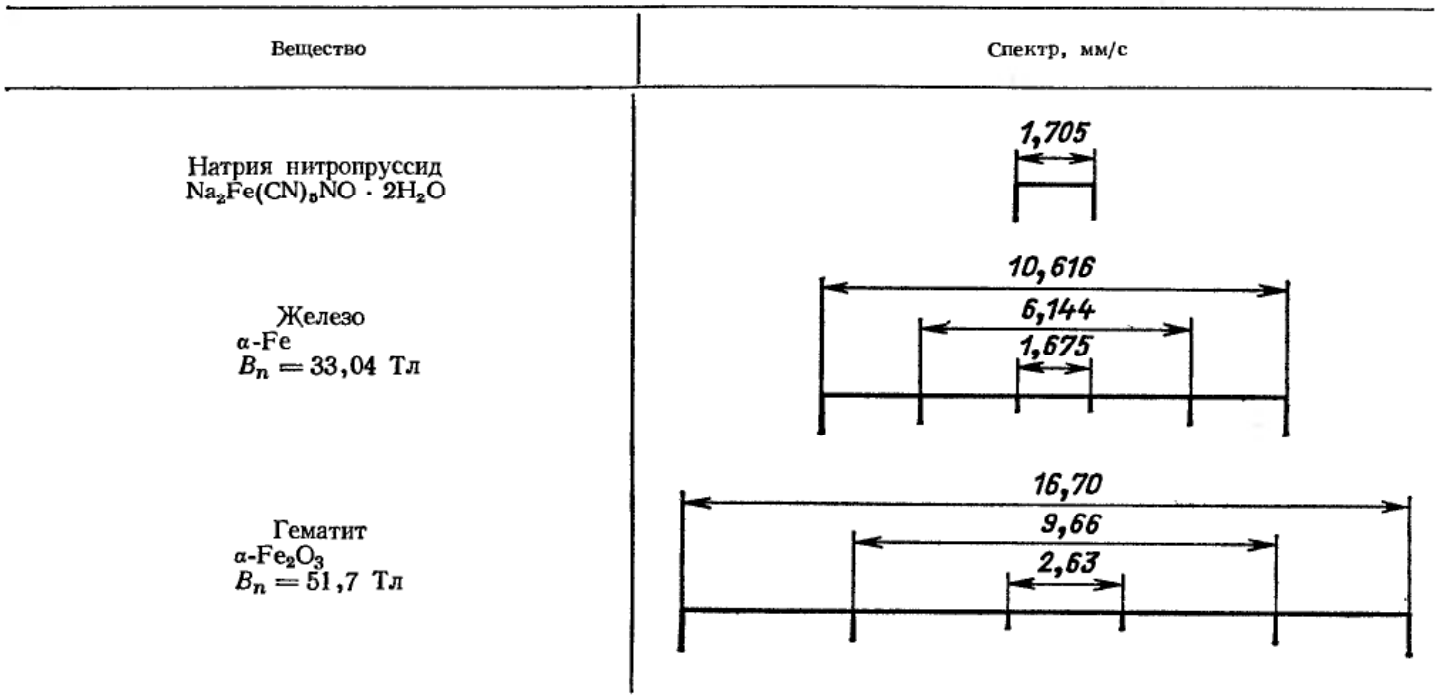


Рис. 38.1. Схематическое изображение мессбауэровских спектров поглощения для ядер ^{57}Fe при температуре 300 К в различных материалах, используемых в качестве эталонных образцов для градуировки спектрометров [8]

В табл. 38.3 приведены следующие характеристики:

формула химического соединения (сплава), содержащего мессбауэровские ядра в стабильном состоянии (поглотитель);

T_A — температура поглотителя (если не указана, то наиболее вероятна температура 25 °С);

формула химического соединения (сплава), содержащего радиоактивные материнские ядра, или химический символ матрицы, в которую введены атомы материнского изотопа (источник);

T_S — температура источника;

Г — ширина отдельной линии экспериментально наблюдаемого мессбауэровского спектра;

ε — максимальный эффект поглощения, определяемый по формуле $\varepsilon = [N\infty) - N(v_0)]/N(\infty)$; если ε приводится с учетом фона от постороннего излучения, рядом с цифрой стоит индекс 0;

δ — сдвиг наблюдаемого спектра, отсчитываемый от значения $v = 0$; δ считается положительным в случае движения источника и поглотителя навстречу друг другу (если знак δ не указан, наиболее вероятным считается положительное значение);

Δ — квадрупольное расщепление;

B_n — индукция магнитного поля, действующего на ядре атомов мёссбауэровского изотопа в данном веществе (поглотителе);

f_S, f_A — вероятности излучения и поглощения γ-квантов без отдачи энергии.

В табл. 38.4 приведены основные параметры мёссбауэровских спектров ядер ^{237}Np в некоторых веществах [11].

Таблица 38.2. **Положения линий спектра α-Fe для гелиевой температуры и $t = 25$ °С**
Источник — кобальт в матрице палладия при температуре 25 °С

T, К	Номер линии и ее положение в спектре, мм/с						δ, мм/с	B_n, Тл
	1	2	3	4	5	6		
298	—5,482	—3,247	—1,013	0,662	2,897	5,134	—0,175	—330,4
4,2	—5,501	—3,210	—0,917	0,801	3,095	5,394	—0,056	—339,0

Таблица 38.3. **Значения параметров мёссбауэровских спектров**

Поглотитель		Источник		Γ, мм/с	ε, %	δ, мм/с	Δ, мм/с	B_n, Тл	f_S	f_A
Формула	T_A, K	Формула	T_S, K							
KCl	4,2	KCl (α, *p*)	4,2	11	16	—0,14	—	—	—	—
Fe	4,2	Cu(Co)	4,2	0,20	36	—0,226	—	33,0	—	—
Fe	4,2	Pd(Co)	4,2	—	—	—0,185	—	—	—	—
Fe	298	Pt(Co)	298	0,22	10_0	—0,347	—	—	—	—
Fe	300	Нержавеющая сталь 310 (Co)	300	0,39	16_0	+0,090	—	—	—	—
Нержавеющая сталь 310	300	Cr(Co)	300	0,48	21	+0,05	—	—	—	—
Нержавеющая сталь 310	300	Cu(Co)	300	0,45	45_0	—0,32	—	—	—	—
Нержавеющая сталь 310	300	Au(Co)	300	0,48	—	—0,78	—	—	0,67	—
Нержавеющая сталь 310	300	UO_2(Co)	300	—	—	0,32	—	—	—	—
Нержавеющая сталь 310	300	Нержавеющая сталь 310 (Co)	300	0,53	47_0	—	—	—	—	—
α-F_2O_3	300	Cr(Co)	300	0,40	—	+0,51	0,40	51,7	—	—
α-Fe_2O_3	300	Нержавеющая сталь 310 (Co)	300	—	—	+0,47	0,40	—	—	—
$KFeS_2$	298	Pd(Co)	298	0,28	18_0	—0,01	0,50	—	—	—
$Na_2Fe(CN)_5NO \cdot 2H_2O$	296	Cu(Co)	296	—	—	—0,484	1,705	—	—	—
$Na_2Fe(CN)_5NO \cdot 2H_2O$	296	Pt(Co)	300	0,26	21	—0,61	1,712	—	—	—
$Na_2Fe(CN)_5NO \cdot 2H_2O$	300	Нержавеющая сталь 310 (Co)	300	0,38	13_0	—0,17	1,712	—	—	—
Ni	80	Ni (кулоновское возбуждение)	80	3,3	4	—	—	—	0,09	0,09
Ni	77	Ni (кулоновское возбуждение)	77	—	—	—	—	9,0	—	—
ZnO	4,2	MgO(Ga)	4,2	0,006	—	—0,021	—	—	—	—
ZnO	4,2	ZnO	4,2	—	0,2	0	—	—	—	—
Ge	77	Ge (кулоновское возбуждение)	77	4,4	0,64	+0,11	—	—		
Ru	88	Ru (Rh)	85	0,37	4_0	—	—	—	0,01	—
Sn	77	Sn	77	0,6	—	—	—	—	0,14	—
Sn	77	SnO_2	77	1,4	—	+2,55	—	—	0,29	—
Mg_2Sn	300	Mg_2Sn	300	1,0	5	—	—	—	—	—
SnO_2	300	SnO_2	300	1,4	31	—	—	—	0,70	—
Te	4,2	Te	4,2	5,2	25	—	7,8	—	—	—
TeO_2	300	TeO_2	77	5,2	—	—	—	—	0,12	0,07
$Na_3H_2{}^{127}IO_6$	20	ZnTe	20	4,1	—	+1,6	—	—	—	—
$^{129}I_2$	100	ZnTe	120	0,87	—	+0,82	—	—	—	—
$Na^{129}I$	77	ZnTe	77	—	—	—0,46	—	—	0,15	0,29
$^{129}XeF_2$	77	NaI	4,2	21	2	0	42	—	—	—
$^{129}XeF_2$	77	NaI	4,2	9	2	0	42	—	—	—
$Na_4{}^{129}XeO_6$	4,2	NaI	4,2	13	5,4	—0,3	—	—	—	—
$^{131}XeF_4$	4,2	$Na_2H_3IO_6$	—	6,8	—	—	6,0	—	—	—
CsCl	4,2	$BaCl_2 \cdot 2H_2O$	4,2	1,1	$0,3_0$	—0,01	—	—	—	—
Sm_2O_3	—	Eu_2O_3	—	4	—	—	—	—	—	—
^{151}Eu	4,2	Eu_2O_3(Gd)	4,2	—	—	—8,1	—	—	—	—
$^{151}Eu_2O_3$	77	Eu_2O_3(Gd)	77	—	25	—	—	—	—	—
$EuPd_2Si_2$	292	$^{151}Sm_2O_3$	292	2,41	—	—8,06	1,23	—	0,54	0,54
$^{155}Gd_2O_3$ (60 кэВ)	80	Sm_2O_3(Eu)	80	4,3	—	—	—	—	—	—
$^{155}Gd_2O_3$ (86 кэВ)	80	Sm_2O_3(Eu)	80	1,1	0,56	—	—	—	0,012	0,012
Tb_4O_7	80	Dy_2O_3	80	80	2	—	—	—	—	—
$^{161}Dy_2O_3$	300	Dy_2O_3	300	12	—	—	—	—	0,10	—

Поглотитель		Источник		Γ, мм/с	ε, %	δ, мм/с	Δ, мм/с	B_n, Тл	f_S	f_A
Формула	T_A, К	Формула	T_S, К							
$^{161}Dy_2O_3$	—	Gd_2O_3 (Tb)	300	13	6	—	—	—	0,23	—
$^{166}Er_2O_3$	20	Ho_2O_3	20	2	21_0	0	—	—	—	—
Tm	—	Er_2O_3	800	30	—	+5	144	700,0	—	—
Tm_2O_3	—	Er_2O_3	300	14	4	—	—	—	—	—
$^{170}Yb_2O_3$	20	Tm	20	—	3,5	+5,7	—	—	—	—
$^{171}Yb_2O_3$	4,2	Er_2O_3 (Tm)	4,2	11	10	—	11	—	—	—
Hf_2O_3	—	Lu_2O_3	—	11	—	—	—	—	0,11	0,04
Ta	—	W	300	0,26	4,5	+0,9	—	—	—	—
TaC	300	W	300	0,06	0,6	—	—	—	—	—
^{182}W	22	Ta	22	2,0	44_0	+1,3	—	—	—	—
$^{182}W_2O_3$	77	Ta	77							
^{183}W	300	Ta	300	40	4,4	+0,17	—	—	—	—
$^{184}WCl_6$	4,2	W(Re)	4,2	—	—	−0,10	—	—	—	—
^{186}W	4,2	Re	4,2	4,26	—	—	—	—	—	—
^{186}Os	10	Re	10	3,3	74	—	—	—	—	—
^{188}Os	15	Re	15	7,5	23_0	—	—	—	0,02	0,11
$Ir(CO)_3Cl_{1,1}$	4,2	^{193}Ir	4,2	—	—	−0,04	2,06	—	—	—
^{191}Ir	91	Os	91	29	1,1	—	—	—	0,07	—
^{193}Ir	4,2	Os	4,2	—	—	+0,6	—	—	—	—
Pt	20	Pt(Au)	20	—	4	—	—	—	—	0,13
Pt	—	Cu(Au)	4,2	20	4	—	—	—	—	—
Au	4,2	Pt	4,2	6	8_0	−1,2	—	—	0,34	0,14
$^{199}Hg_2Pt$	4,2	^{199}Au(Pt)	4,2	0,37	0,004	+0,1	1,83	—	0,004	0,004
^{231}Pa	4,2	$^{231}ThO_2$	4,2	4,1	0,73	+0,1	7,8	—	—	—
$^{232}ThO_2$	25	^{232}Th (кулоновское возбуждение)	30	9,6	—	+0,08	—	—	0,31	0,35
$^{238}UO_2$	4,2	$^{242}PuO_2$	4,2	45	4	+2	—	270,0	—	—
$^{239}PuO_2$	4,2	$^{239}NpO_2(ThO_2)$	4,2	5,1	2	0	—	—	—	—
$^{240}PuO_2$	4,2	$^{244}CmO_2$	4,2	58	1,2	0,5	—	—	—	—
$^{243}AmO_2$	4,2	$^{243}PuO_2$	4,2	22	0,66	0	0	0	—	—
$^{237}NpAl_2$	4,2	^{241}Am (Th)	78	1,1	0,04	10	—	—	—	—

Таблица 38.4. **Значения параметров спектров ядер ^{237}Np в некоторых матрицах**

Поглотитель	T, К	Источник	T, К	δ, мм/с	B_n, Тл	Δ, мм/с	Γ, мм/с
NpO_2	4,2	NpO_2 (UO_2)	4,2	0	—	—	6
NpO_2	78	NpO_2 (UO_2)	78	0	—	—	3
$NpAl_2$	78	NpO_2 (UO_2)	78	+5,6	0	0	2
$NpAl_2$	4,2	NpO_2 (UO_2)	4,2	+6,7	315,0	0,55	—
NpO_2	4,2	Am	4,2	+7,5	4,0	—	4,1
NpO_2	78	Am	4,2	—	0	—	3,2
NpO_2	78	Am	78	+7,5	0	—	2,6
$NpAl_2$	78	Am	4,2	—	0	—	3,0
NpO_2	4,2	Th(Am)	4,2	+3,5	4,0	—	2,0
NpO_2	77	Th(Am)	77	+3,5	0	—	1,7
Np_3O_8	77	Th(Am)	77	−2,1	0	1,4	—
$NpAl_2$	78	Th(Am)	4,2	—	0	—	1,1
NpO_2	4,2	Cu(Am)	4,2	—	—	—	10,8
NpO_2	77	$NpO_2(AmO_2)$	77	0	—	—	2,5
NpO_2	77	UO_2	77	—	—	—	1,7
NpO_2	77	AmO_2—I	77	+1,1	—	—	—
NpO_2	77	AmO_2—II	77	+25,2	—	—	—
$NpCl_4$	4,2	$NpO_2(UO_2)$	4,2	+2,2	260,0	−4,2	—
$NpCl_4$	77	$NpO_2(UO_2)$	77	+1,7	0	8,8	—
NpO_2	77	Am_2O_3—I	77	+1,8	—	—	—
NpO_2	77	Am_2O_3—II	77	+28	—	—	—
NpO_2	4,2	AmF_3	4,2	−44,6	—	—	—

Поглотитель	T, К	Источник	T, К	δ, мм/с	B_n, Тл	Δ, мм/с	Γ, мм/с
NpO_2	4,2	$Am_2(C_2O_4)_3 \cdot 6H_2O$	4,2	—40,5	—	—	—
NpO_2	77	$AmCl_3$	77	—38,5	—	—	—
NpO_2	77	AmOCl	77	—35,6	—	—	—
NpO_2	4,2	$Am(OH)_4 \cdot H_2O$	4,2	—40,9	—	—	—
NpO_2	4,2	$K_5[AmO_2(CO_3)_5]_3$	4,2	+25,0	—	—	—
NpO_2	77	AmSb	4,2	+21,0	—	—	—
NpO_2	77	Am_3Se_4	4,2	+27	—	39	—
NpO_2	77	Am_3Te_4	4,2	+29	—	39	—
NpO_2	77	Am_2C_3	4,2	—6,5	—	134	—
Np_2C_3	77	Am	4,2	—7,4 (NpO_2)	240,0	—	—
α-Np-I	4,2	—	4,2	+2,0 (NpO_2)	—	29,3	—
α-Np-II	4,2	—	4,2	—0,7 (NpO_2)	—	92,4	—
$NpO_2(NO_3)_2 \cdot xH_2O$	4,2	Th(Am)	4,2	—36 (NpO_2)	270,0	1,8	—
$K_3NpO_2F_5$	4,2	Th(Am)	4,2	—46 (NpO_2)	230,0	5,0	—
$KNpO_2CO_3$	4,2	Th(Am)	4,2	—12 (NpO_2)	640,0	—3,1	—
$HNpO_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$	4,2	Th(Am)	4,2	—17 (NpO_2)	680,0	2,8	—
$NpRh_3$	4,2	Th(Am)	4,2	—3,21 ($NpAl_2$)	—	—	1,7
$NpPd_3$	4,2	Th(Am)	4,2	—2,19 ($NpAl_2$)	335,0	—	1,7
$NpGe_3$	4,2	Th(Am)	4,2	+0,76 ($NpAl_2$)	—	—	1,7
$NpSn_3$	4,2	Th(Am)	4,2	+1,82 ($NpAl_2$)	55,0	—	1,7
NpC	4,2	—	4,2	—12	479,0	1,1	—
NpAs	4,2	—	—	—	470,0	—	—
NpSb	4,2	—	—	—	470,0	—	—
NpP-I	4,2	—	—	—	330,0	—	—
NpP-II	4,2	—	—	—	420,0	—	—
NpN	4,2	—	—	—	270,0	—	—
$RbNpO_4$	4,2	Am	4,2	—52,2	—	150	3,5
$CsNpO_4$	4,2	Am	4,2	—52,7	—	138	3,2
Cs_3NpO_5	4,2	Am	4,2	—58,0	—	81,5	2,7
Li_5NpO_6	4,2	Am	4,2	—63,2	—	35	3,0
Rb_3NpO_5	4,2	Am	4,2	—59,0	—	90	2,6
$NpAs_2$	4,2	Am	4,2	+3,0 ($NpAl_2$)	288,0	23	4,5
NpF_3	4,2	Am	4,2	+41 ($NpAl_2$)	—	0,55	—
$NpMo_6Se_8$	4,2	Am	4,2	+28 ($NpAl_2$)	—	—	—
$NpTe_2$	4,2	Am	4,2	+27,5 ($NpAl_2$)	—	—	—
NpS	4,2	Am	4,2	+18,5 ($NpAl_2$)	170,0	—	—
$NpSb_2$	4,2	Am	4,2	+18($NpAl_2$)	—	—	—
$NpSe_3$	4,2	Am	4,2	+6($NpAl_2$)	—	—	—
NpS_3	4,2	Am	4,2	—2($NpAl_2$)	—	—	—
NpF_4	4,2	Am	4,2	—8($NpAl_2$)	—	—	—
NpF_5	4,2	Am	4,2	—38($NpAl_2$)	—	—	—
NpF_6	4,2	Am	4,2	—64($NpAl_2$)	—	—	—
K_2NpO_4	4,2	—	—	—57($NpAl_2$)	109,0	18	—
$NpCo_2Si_2$	4,2	Am	4,2	+12,9	287,0	—	—
$[(C_2H_5)_4N]_2NpCl_6$-I	4,2	Th(Am)	4,2	+7,1	110,0	2,7	—
$[(C_2H_5)_4N]_2NpCl_6$-II	4,2	Th(Am)	4,2	+7,5	101,0	3,3	—
$[(CH_3)_4N]_2NpCl_6$	4,2	Th(Am)	4,2	—6,6	137,0	0,9	—
$Cs_2[Np(NO_3)_6]$	4,2	Th(Am)	4,2	—4,0($NpAl_2$)	107,0	—3,3	—
$NpRu_2$	4,2	—	4,2	—17 ($NpAl_2$)	—	—	—
$NpIr_2$	4,2	—	—	—11 ($NpAl_2$)	108,0	0	—
$NpOs_2$	4,2	—	—	—15 ($NpAl_2$)	76,0	—	—
$NpCo_2$	4,2	—	—	—22,5	90,0	—0,4	—
$NpNi_2$	4,2	—	—	—17,9	230,0	—1	—
$NpFe_2$	4,2	—	—	—24,0	167,0	—2,8	—
$NpMn_2$	4,2	—	—	—20,0	40,0	—	—
$NpAl_3$	4,2	—	—	—	263,0	—	—
Np_3S_5-I	4,2	Am	4,2	—5	255,0	2	—
Np_3S_5-II	4,2	Am	4,2	+28	260,0	—1	—

Таблица 38.5. **Относительный изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{57}Fe (α-Fe)**

Источник	Поглотитель										
	ННП	Cr	Нержавеющая сталь	НФЦ	КФЦ	α-Fe	Rh	Pd	Cu	Pt	α-Fe_2O_3
ННП	0	0,107	0,173	0,188	0,232	0,265	0,354	0,436	0,480	0,612	0,629
Cr	—0,107	0	0,066	0,081	0,125	0,158	0,247	0,329	0,373	0,505	0,522
Нержавеющая сталь	—0,173	—0,066	0	0,015	0,059	0,092	0,180	0,263	0,307	0,438	0,456
НФЦ	—0,188	—0,081	—0,015	0	0,044	0,076	0,165	0,248	0,292	0,423	0,440
КФЦ	—0,232	—0,125	—0,059	—0,044	0	0,033	0,121	0,204	0,248	0,379	0,397
α-Fe	—0,265	—0,158	—0,092	—0,076	—0,033	0	0,089	0,171	0,215	0,347	0,364
Rh	—0,354	—0,247	—0,180	—0,165	—0,121	—0,089	0	0,083	0,127	0,258	0,275
Pd	—0,436	—0,329	—0,263	—0,248	—0,204	—0,171	—0,083	0	0,044	0,175	0,193
Cu	—0,480	—0,373	—0,307	—0,292	—0,248	—0,215	—0,127	—0,044	0	0,131	0,149
Pt	—0,612	—0,505	—0,438	—0,423	—0,379	—0,347	—0,258	—0,175	—0,131	0	0,017
α-Fe_2O_3	—0,629	—0,522	—0,456	—0,440	—0,397	—0,364	—0,275	—0,193	—0,149	—0,017	0

Примечание. ННП — натрия нитропруссид, НФЦ — натрия ферроцианид, КФЦ — калия ферроцианид.

38.4. ИЗОМЕРНЫЙ СДВИГ

В табл. 38.5—38.21 приведены относительные изомерные сдвиги δ для ядер резонансного изотопа в материалах, используемых в качестве стандартных источников и эталонных поглотителей [12—14]. Для каждого изотопа в скобках указан стандартный эталон.

Таблица 38.6. **Относительный изомерный сдвиг, мм/с, δ для ^{99}Ru (Ru)**

Источник	Поглотитель		
	RuO_2	Ru	Ru(Rh)
RuO_2	0	0,25	0,26
Ru	—0,25	0	0,006
Ru(Rh)	—0,26	—0,006	0

Таблица 38.7. **Отиосительиый изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{119}Sn(SnO_2)**

Источник	Поглотитель								
	SnO_2	Me_2SnF_2	V(Sn)	Pd(Sn)	Pd_3Sn	Mg_2Sn	α-Sn	β-Sn	SnTe
SnO_2	0	1,29	1,58	1,59	1,76	1,86	2,02	2,54	3,46
$MeSnF_2$	—1,29	0	0,29	0,30	0,47	0,57	0,73	1,26	2,17
V(Sn)	—1,58	—0,29	0	0,01	0,18	0,28	0,44	0,96	1,88
Pd(Sn)	—1,59	—0,30	—0,01	0	0,17	0,27	0,43	0,95	1,87
Pd_3Sn	—1,76	—0,47	—0,18	—0,17	0	0,10	0,26	0,78	1,70
Mg_2Sn	—1,86	—0,57	—0,28	—0,27	—0,10	0	0,16	0,682	1,60
α-Sn	—2,02	—0,73	—0,44	—0,43	—0,26	—0,16	0	0,52	1,44
β-Sn	—2,54	—1,26	—0,96	—0,95	—0,78	—0,682	—0,52	0	0,92
SnTe	—3,46	—2,17	—1,88	—1,87	—1,70	—1,60	—1,44	—0,92	0

Примечание. Изомерные сдвиги для SnO_2, $CaSnO_3$ и $BaSnO_3$ экспериментально идентичны.

Таблица 38.8. **Отиосительный изомерный сдвиг δ для ^{121}Sb(InSb)**

Источник	Поглотитель			
	β-Sn	InSb	$Ni_{21}Sn_2B_6$	SnO_2
β-Sn	0	2,6	4,3	11,1
InSb	—2,6	0	1,67	8,55
$Ni_{21}Sn_2B_6$	—4,3	—1,67	0	6,88
SnO_2	—11,1	—8,55	—6,88	0

Таблица 38.9. **Относительный изомериый сдвиг δ, мм/с, для ^{125}Te(ZnTe)**

Источник	Поглотитель					
	β-TeO_3	Cu(Sb)	Cu(I)	ZnTe	SnTe	PbTe
β-TeO_3	0	1,07	1,11	1,14	1,2	1,31
Cu(Sb)	—1,07	0	0,04	0,07	0,1	0,24
Cu(I)	—1,11	—0,04	0	0,03	0,1	0,19
ZnTe	—1,14	—0,07	—0,03	0	0,1	0,17
SnTe	—1,2	—0,1	—0,1	—0,1	0	0,1
PbTe	—1,31	—0,24	—0,19	—0,17	—0,1	0

Таблица 38.10. **Относительный изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{127}I(CuI)**

Источник	Поглотитель				
	ZnTe	CsI	NaI	KI	CuI
ZnTg	0	0.12	0,14	0,16	0,28
CsI	—0,12	0	0,02	0,04	0,16
NaI	—0,14	—0,02	0	0,02	0,14
KI	—0,16	—0,04	—0,02	0	0,13
CuI	—0,28	—0,16	—0,14	—0,13	0

Таблица 38.11. **Отиосительиый изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{129}I(CuI)**

Источник	Поглотитель				
	NaI	KI	CuI	CsI	ZnTe
NaI	—	0,01	0,05	0,08	0,45
KI	—0,01	0	0,04	0,07	0,44
CuI	—0,05	—0,04	0	0,03	0,41
CsI	—0,08	—0,07	—0,03	0	0,38
ZnTe	—0,45	—0,44	—0,41	—0,38	0

Таблица 38.12. **Относительиый изомериый сдвиг δ, мм/с, для ^{149}Sm(SmF_3)**

Источник	Поглотитель			
	EuF_3	Eu_2O_3	SmF_3	Fm_2O_3
EuF_3	0	0,01	0,01	0,04
Eu_2O_3	—0,01	0	0,00	0,03
SmF_3	—0,01	0,00	0	0,03
Sm_2O_3	—0,04	—0.03	—0,03	0

Таблица 38.13. **Относительный изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{151}Eu(EuF_3)**

Источник	Поглотитель					
	EuS	SmF_3	EuF_3	$EuF_3 \cdot 2H_2O$	Eu_2O_3	Sm_2O_3
EuS	0	11,45	11,50	11,53	12,52	12,56
SmF_3	—11,45	0	0,05	0,09	1,07	1,11
EuF_3	—11,50	—0,05	0	0,038	1,024	1,06
$EuF_3 \cdot 2H_2O$	—11,53	—0,09	—0,038	0	0,98	1,02
Eu_2O_3	—12,52	—1,07	—1,024	—0,98	0	0,04
Sm_2O_3	—12,56	—1,11	—1,06	—1,02	—0,04	0

Таблица 38.14. **Относительный изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{153}Eu(EuF_3)**

Источник	Поглотитель			
	Eu_2O_3	Sm_2O_3	EuF_3	EuS
Eu_2O_3	0	0,25	1,2	15,2
Sm_2O_3	—0,25	0	0,9	15,0
EuF_3	—1,2	—0,9	0	14,0
EuS	—15,2	—15,0	—14,0	0

Таблица 38.15. **Относительный изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{155}Cd(CdF_3)**

Источник	Поглотитель			
	Pd(Eu)	Gd	$SmAl_3$(Eu)	GdF_3
Pd(Eu)	0	0,07	0,53	0,66
Gd	—0,07	0	0,46	0,59
$SmAl_3$(Eu)	—0,53	—0,46	0,0	0,14
GdF_3	—0,66	—0,59	—0,14	0

Таблица 38.16. **Относительный изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{161}Dy(DyF_3)**

Источник	Поглотитель					
	DyF_3	GdF_3(Tb)	Gd_2O_3(Tb)	Dy_2O_3	Gd (Tb)	Dy
DyF_3	0	0,2	0,5	0,67	2,26	2,9
GdF_3 (Tb)	—0,2	0	0,3	0,5	2,1	2,7
Gd_2O_3(Tb)	—0,5	—0,3	0	0,1	1,7	2,4
Dy_2O_3	—0,67	—0,5	—0,1	0	1,6	2,21
Gd (Tb)	—2,26	—2,1	—1,7	—1,6	0	0,62
Dy	—2,9	—2,7	—2,4	—2,21	—0,62	0

Таблица 38.17. **Относительный изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{170}Yb($YbAl_2$)**

Источник	Поглотитель						
	YbB_6	Yb	$YbAl_2$	TmB_{12}	$TmAl_2$	$YbAl_3$	Tm
YbB_6	0	0,18	0,19	0,22	0,26	0,30	0,35
Yb	—0,18	0	0,02	0,04	0,09	0,12	0,17
$YbAl_2$	—0,19	—0,02	0	0,02	0,07	0,10	0,15
TmB_{12}	—0,22	—0,04	—0,02	0	0,05	0,08	0,13
$TmAl_2$	—0,26	—0,09	—0,07	—0,05	0	0,03	0,08
$YbAl_3$	—0,30	—0,12	—0,10	—0,08	—0,03	0	0,05
Tm	—0,35	—0,17	—0,15	—0,13	—0,08	—0,05	0

Таблица 38.18. **Относительиый изомериый сдвиг δ, мм/с, для ^{181}Ta(Ta)**

Источник	Поглотитель		
	Mo(W)	W	Ta
Mo(W)	0	21,8	22,6
W	—21,8	0	0,835
Ta	—22,6	—0,835	0

Таблица 38.19. **Относительиый изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{193}Ir(Ir)**

Источник	Поглотитель			
	Pt	Ir	Os	V(Os)
Pt	0	0,645	1,183	2,34
Ir	—0,645	0	0,539	1,70
Os	—1,183	—0,539	0	1,16
V(Os)	—2,34	—1,70	—1,16	0

Таблица 38.20. **Относительный изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{197}Au(Au)**

Источник	Поглотитель	
	Au	Pt
Au	0	1,23
Pt	—1,23	0

Таблица 38.21. **Относительный изомерный сдвиг δ, мм/с, для ^{237}Np($NpAl_2$)**

Источник	Поглотитель			
	Am	Th(Am)	NpO_2	$NpAl_2$
Am	0	4,0	7,5	13,8
Th(Am)	—4,0	0	3,5	9,8
NpO_2	—7,5	—3,5	0	6,3
$NpAl_2$	—13,8	—9,8	—6,3	0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Химические применения мессбауэровской спектроскопии:** Сб. статей: Пер. с англ./Под ред. В. И. Гольданского, Л. И. Крижанского. В. В. Храпова. М.: Мир, 1970.
2. **Быков Г. М., Фам Зуй Хиен**//Журн. эксперим. и теорет. физ. 1962. Т. 43, № 3. С. 909—918.
3. **Вертхейм Г.** Эффект Мессбауэра: Пер. с англ./ /Под ред. В. В. Скляревского. М.: Мир, 1966.
4. **Шпинель В. С.** Резонанс гамма-излучений в кристаллах. М.: Мир, 1969.
5. **Иркаев В. С., Кузьмин Р. Н., Опаленко А. А.** Ядерный гамма-резонанс. М.: Изд-во МГУ. 1970.
6. **Суздалев И. П.** Динамические эффекты в гамма-резонансной спектроскопии. М. Атомиздат, 1979.
7. **Shirley D. A.**//Rev. Mod. Phys. 1964. Vol. 36. P. 339—352.
8. **Muir A. H., Ando K. J., Coogan H. M.** Mössbauer Effect Data Index 1958—1965. N. Y. — London—Sydney: Interscience Publ., 1966.
9. **Stevens J. G., Stevens V. E.** Mössbauer Effect Data Index, covering the 1976 literature. N. Y.: Plenum Press, 1978.
10. **Violett C.E., Pipkorn D. N.**//J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42, N 11. P. 4339—4342.
11. **Бескровный А. И., Лебедь Н. А., Остаиевич Ю. М.:** Proc. of the Conf. on Mössbauer Spectrometry. Dresden. 1971. Vol. 2. P. 583—586.
12. **Ruby S. L. e. a.**//Phys. Rev. 1969. Vol. 184. P. 374—382.
13. **Stevens J. G., Gettis W. L.** Isomer Shift Reference Scales: Intern. Conf. Mössbauer Effect. Jaipur, India, 1981.
14. **Kalvius G. M., Wagner F. E., Potzel W.**//J. de Phys. Colloq. C-6. 1976. Vol. 97. P. 657—671.

Глава 39
ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

В. П. Рудаков

39.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В ядерной физике в настоящее время принято различать два класса микрообъектов: атомные ядра и элементарные частицы. Атомными ядрами называют объекты, состоящие из протонов и нейтронов и имеющие массовое число два и более. Все остальные микрообъекты относят к элементарным частицам. Если не требуется специальных уточнений, то и атомные ядра, и элементарные частицы называют микрочастицами или просто частицами.

Ядерной реакцией называют процесс взаимодействия элементарной частицы с ядром или ядер друг с другом. Обычно ядерную реакцию записывают в виде

$$A + a \rightarrow B + b$$

или сокращенно

$$A\,(a,\ b)\,B.$$

Такая запись означает, что в начальной стадии реакции (во входном канале) взаимодействуют две частицы A и a, в результате чего в конечной стадии (выходном канале) появляются частицы B и b. Эти частицы могут быть теми же, что и во входном канале (упругое рассеяние); они могут быть теми же частицами, что и во входном канале, но в других внутренних состояниях (неупругое рассеяние); наконец, это могут быть другие частицы и в общем случае их может быть не две, а несколько.

Каждая ядерная реакция описывается двумя основными характеристиками: вероятностью ее протекания и энергетикой, т. е. количеством поглощаемой или выделяемой энергии.

Вероятность ядерной реакции описывается *сечением.* Единица сечения — квадратный метр или любая его дольная единица, например 10^{-30} м^2=1 фм^2. Раньше для сечения использовалась внесистемная единица барн; 1 б= 10^{-28} м^2.

Дифференциальное сечение реакции — это величина, пропорциональная вероятности вылета данной частицы — продукта реакции под определенным углом (относительно направления движения частицы, вызвавшей реакцию) и с данной энергией. Эта величина обозначается $d\sigma/d\Omega$ и выражается в единицах м^2/ср. Интеграл от дифференциального сечения по полному телесному углу дает полное сечение.

Сечение реакции определяется в конечном счете свойствами сил взаимодействия между частицами и в настоящее время может быть точно рассчитаио только для упругого рассеяния в кулоновском поле (резерфордовское рассеяние). Расчет сечений всех остальных разнообразнейших реакций ведется в рамках различных моделей и дает лишь оценочные данные.

Библиография по исследованиям конкретных ядерных реакций и схемы уровней ядер периодически публикуются в журналах Nuclear Data Sheets и Nuclear Physics.

39.2. СЕЧЕНИЕ РЕЗЕРФОРДОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Дифференциальиое сечение резерфордовского рассеяния $d\sigma/d\Omega$, фм^2/ср, нерелятивистской частицы с массой m, зарядом ze и энергией E на ядре с массой M и зарядом Ze вычисляется по формуле

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{СЦМ}} = 0{,}1296\left(\frac{zZ}{4E}\right)^2\left(\frac{m+M}{M}\right)^2 \operatorname{csc}^4\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

где E — энергия падающей частицы в лабораторной системе координат (ЛСК), МэВ; θ — угол рассеяния в системе центра масс (СЦМ).

Это же сечение в ЛСК получается, если вместо $\operatorname{csc}^4(\theta/2)$ подставить $\operatorname{csc}^4(\psi/2) - 2(m/M)^2 + \ldots$, где угол ψ отсчитывается в ЛСК. Следуюший член разложения в скобках имеет порядок $(m/M)^4$.

39.3. ЭНЕРГИЯ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ

Энергетические соотношения в ядерной реакции определяются законами сохранения энергии и импульса.

Энергией реакпии $A(a, b)B$ называется величина

$$Q = \left[\left(M_A + M_a\right) - \left(M_B + M_b\right)\right] c^2,$$

где M_i — массы участвующих в реакции частиц; c — скорость света.

Для вычисления Q обычно пользуются не массами ядер, а дефектами масс. Дефектом массы называют величину $\Delta M = M - A$, где M — реальная масса частицы (атома); A — так называемое массовое число, суммарное число нуклонов (протонов и нейтронов) в атомном ядре. Если M выражать в атомных единицах массы (а.е.м.) и числу A приписать ту же единицу, то и ΔM получится в а.е.м. Одна а.е.м. равна 1/12 массы нуклида ^{12}C и составляет $1{,}6605655 \cdot 10^{-27}$ кг. Для вычисления энергии реакции ΔM удобнее выражать в килоэлектрон-вольтах: а.е.м. = 931501,59 кэВ.

Смысл использования дефекта масс заключается в том, что при расчетах можно оперировать числами во много раз меньшими, чем массы ядер или энергии связи:

$$Q = (\Delta M_A + \Delta M_a) - (\Delta M_B + \Delta M_b).$$

Значения дефектов масс приведены в табл. 39.1.

Таблица 39.1. **Дефекты масс $\Delta M = M - A$, кэВ [1]** (N — число нейтроиов; Z — число протонов; $A = N + Z$ — массовое число; с — масса получена в результате интерполяции или экстраполяции на основе имеющейся систематики)

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
1	0	1	n	8071,431 (39)
0	1		H	7289,034 (23)
1	1	2	H	13 135,84 (4)
2	1	3	H	14 949,94 (5)
1	2		He	14 931,32 (5)
3	1	4	H	25 920 (500)
2	2		H	2424,94 (4)
1	3		Li	25 130 (300)
4	1	5	H	33 790 (800)
3	2		He	11 390 (50)
2	3		Li	11 680 (50)
4	2	6	He	17 597,0 (35)
3	3		Li	14 087,3 (8)
2	4		Be	18 375 (6)
5	2	7	He	26 111 (30)
4	3		Li	14 908,2 (9)
3	4		Be	15 770,1 (9)
2	5		B	29 940 (100)
6	2	8	He	31 609 (12)
5	3		Li	20 946,9 (9)
4	4		Be	4941,76 (10)
3	5		B	22 921,9 (13)
2	6		C	35 085 (25)
6	3	9	Li	24 954,8 (20)
5	4		Be	11 348,0 (4)
4	5		B	12 416,1 (10)
3	6		C	28 912,1 (39)
7	3	10	Li	33 830 (250)
6	4		Be	12 607,6 (6)
5	5		B	12 051,7 (5)
4	6		C	15 702,9 (7)
3	7		N	39 500 (c)
8	3	11	Li	40 940 (120)
7	4		Be	20 176 (6)
6	5		B	8667,9 (4)
5	6		C	10 650,0 (11)
4	7		N	25 230 (100)
8	4	12	Be	25 030 (40)
7	5		B	13 369,5 (13)
6	6		C	0,0 (0,0)
5	7		N	17 338 (1)
4	8		O	32 070 (260)
9	4	13	Be	34 900 (c)
8	5		B	16 562 (4)
7	6		C	3125,038 (18)
6	7		N	5345,6 (9)
5	8		O	23 105 (10)
10	4	14	Be	40 970 (c)
9	5		B	23 657 (30)
8	6		C	3019,922 (24)
7	7		N	9863,444 (23)
6	8		O	8008,3 (5)
5	9		F	33 610 (c)
10	5	15	B	29 530 (c)
9	6		C	9873,2 (8)
8	7		N	101,514 (36)
7	8		O	2855,4 (7)
6	9		F	17 660 (c)
11	5	16	B	38 000 (c)
10	6		C	13 693 (16)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
9	7		N	5681,6 (23)
8	8		O	—4737,02 (4)
7	9		F	10 692 (14)
6	10		Ne	24 110 (140)
12	5	17	B	45 270 (c)
11	6		C	21 060 (c)
10	7		N	7870 (15)
9	8		O	—809,9 (8)
8	9		F	1951,66 (18)
7	10		Ne	16 478 (26)
12	6	18	C	25 370 (c)
11	7		N	13 274 (30)
10	8		O	—783,03 (30)
9	9		F	872,5 (7)
8	10		Ne	5319 (5)
7	11		Na	25 320 (c)
13	6	19	C	34 430 (c)
12	7		N	15 600 (300)
11	8		O	3331,4 (27)
10	9		F	—1487,33 (13)
9	10		Ne	1750,9 (6)
8	11		Na	12 930 (12)
13	7	20	N	22 200 (c)
12	8		O	3799 (8)
11	9		F	—17,1 (6)
10	10		Ne	—7043,0 (5)
9	11		Na	6844 (7)
8	12		Mg	17 568 (27)
14	7	21	N	26 950 (c)
13	8		O	8120 (80)
12	9		F	—47 (7)
11	10		Ne	—5733,1 (11)
10	11		Na	—2185,8 (7)
9	12		Mg	10 912 (16)
14	8	22	O	9490 (220)
13	9		F	2826 (30)
12	10		Ne	—8026,1 (5)
11	11		Na	—5184,0 (7)
10	12		Mg	—394,1 (19)
9	13		Al	18 210 (c)
15	8	23	O	17 950 (c)
14	9		F	3350 (170)
13	10		Ne	—5155,1 (21)
12	11		Na	—9529,6 (8)
11	12		Mg	—5470,6 (15)
10	13		Al	6768 (25)
15	9	24	F	8650 (c)
14	10		Ne	—5949 (10)
13	11		Na	—8417,5 (8)
12	12		Mg	—13 930,6 (7)
11	13		Al	—52 (4)
10	14		Si	10 740 (120)
16	9	25	F	12 840 (c)
15	10		Ne	—2150 (90)
14	11		Na	—9357 (7)
13	12		Mg	—13 190,8 (11)
12	13		Al	—8912,9 (11)
11	14		Si	3824 (10)
16	10	26	Ne	—190 (c)
15	11		Na	—6888 (23)
14	12		Mg	—16 212,4 (9)
13	13		Al	—12 207,6 (10)
12	14		Si	—7143,1 (31)
11	15		P	11 260 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
17	10	27	Ne	6670 (c)
16	11		Na	—5630 (80)
15	12		Mg	—14 585,0 (14)
14	13		Al	—17 194,3 (7)
13	14		Si	—12 385,3 (15)
12	15		P	—590 (c)
17	11	28	Na	—1130 (120)
16	12		Mg	—15 016,4 (22)
15	13		Al	—16 848,2 (8)
14	14		Si	—21 491,2 (6)
13	15		P	—7159,5 (38)
12	16		S	4190 (120)
18	11	29	Na	2660 (150)
17	12		Mg	—10 750 (50)
16	13		Al	—18 212 (5)
15	14		Si	—21 893,7 (8)
14	15		P	—16 949,3 (18)
13	16		S	—3160 (50)
19	11	30	Na	8380 (300)
18	12		Mg	—9790 (c)
17	13		Al	—15 890 (40)
16	14		Si	—24 431,7 (9)
15	15		P	—20 204,5 (27)
14	16		S	—14 062,0 (31)
13	17		Cl	4840 (c)
20	11	31	Na	10 610 (c)
19	12		Mg	—3900 (c)
18	13		Al	—15 100 (100)
17	14		Si	—22 948,7 (10)
16	15		P	—24 439,5 (6)
15	16		S	—19 044,1 (16)
14	17		Cl	—7070 (50)
21	11	32	Na	16 410 (c)
20	12		Mg	—2890 (c)
19	13		Al	—11 290 (c)
18	14		Si	—24 092 (7)
17	15		P	—24 304,7 (8)
16	16		S	—26 015,1 (6)
15	17		Cl	—13 329 (8)
14	18		Ar	—2210 (130)
21	12	33	Mg	4130 (c)
20	13		Al	—9370 (c)
19	14		Si	—20 570 (50)
18	15		P	—26 336,9 (21)
17	16		S	—26 585,9 (8)
16	17		Cl	—21 003,0 (9)
15	18		Ar	—9385 (30)
21	13	34	Al	—4150 (c)
20	14		Si	—20 250 (c)
19	15		P	—24 550 (50)
18	16		S	—29 931,25 (28)
17	17		Cl	—24 438,3 (8)
16	18		Ar	—18 379,2 (30)
15	19		K	—1480 (c)
22	13	35	Al	—840 (c)
21	14		Si	—15 040 (c)
20	15		P	—24 940 (80)
19	16		S	—28 846,27 (21)
18	17		Cl	—29 013,73 (10)
17	18		Ac	—23 048,9 (16)
16	19		K	—11 169 (20)
22	14	36	Si	—12 670 (c)
21	15		P	—20 770 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
20	16		S	—30 665,9 (15)
19	17		Cl	—29 521,77 (21)
18	18		Ar	—30 231,32 (28)
17	19		K	—17 426 (8)
16	20		Ca	—6650 (270)
23	14	37	Si	—7010 (c)
22	15		P	—19 010 (c)
21	16		S	—26 908 (30)
20	17		Cl	—31 761,76 (13)
19	18		Ar	—30 947,9 (6)
18	19		K	—24 799,4 (14)
17	20		Ca	—13 164 (39)
23	15	38	P	—14 560 (c)
22	16		S	—26 862 (12)
21	17		Cl	—29 798,0 (4)
20	18		Ar	—34 715,0 (8)
19	19		K	—28 802,0 (16)
18	20		Ca	—22 060 (9)
17	21		Sc	—4460 (c)
24	15	39	P	—12 300 (c)
23	16		S	—23 000 (c)
22	17		Cl	—29 803 (18)
21	18		Ar	—33 241 (5)
20	19		K	—33 806,2 (8)
19	20		Ca	—27 282 (5)
18	21		Sc	—14 080 (c)
24	16	40	S	—22 240 (c)
23	17		Cl	—27 540 (500)
22	18		Ar	—35 040,2 (7)
21	19		K	—33 535,2 (8)
20	20		Ca	—34 846,8 (8)
19	21		Sc	—20 527 (4)
18	22		Ti	—9040 (230)
25	16	41	S	—18 100 (c)
24	17		Cl	—27 400 (160)
23	18		Ar	—33 067,7 (9)
22	19		K	—35 559,7 (9)
21	20		Ca	—35 138,5 (9)
20	21		Sc	—28 643,5 (16)
19	22		Ti	—15 780 (40)
25	17	42	Cl	—24 420 (c)
24	18		Ar	—34 420 (40)
23	19		K	—35 022,8 (13)
22	20		Ca	—35 543,9 (14)
21	21		Sc	—32 120,7 (16)
20	22		Ti	—25 122 (6)
19	23		V	—8020 (c)
26	17	43	Cl	—23 140 (60)
25	18		Ar	—31 980 (70)
24	19		K	—36 588 (10)
23	20		Ca	—38405,4 (14)
22	21		Sc	—36 185,0 (24)
21	22		Ti	—29 324 (7)
20	23		V	—18 020 (c)
26	18	44	Ar	—32 271 (20)
25	19		K	—35 807 (39)
24	20		Ca	—41 466,0 (14)
23	21		Sc	37 810,7 (24)
22	22		Ti	—37 546,2 (31)
21	23		V	—23 850 (c)
20	24		Cr	—13 500 (130)
27	18	45	Ar	—29 730 (60)
26	19		K	—36 611 (11)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
25	20		Ca	—40 809,6 (15)
24	21		Sc	—41 066,5 (14)
23	22		Ti	—39 004,0 (28)
22	23		V	—31 879 (27)
21	24		Cr	—19 460 (150)
28	18	46	Ar	—29 730 (70)
27	19		K	—35 420 (16)
26	20		Ca	—43 138,2 (37)
25	21		Sc	—41 755,6 (15)
24	22		Ti	—44 122,7 (14)
23	23		V	—37 070,8 (18)
22	24		Cr	—29 461 (30)
21	25		Mn	—12 470 (c)
28	19	47	K	—35 698 (8)
27	20		Ca	—42 342,9 (37)
26	21		Sc	—44 330,5 (24)
25	22		Ti	—44 931,0 (15)
24	23		V	—42 001,1 (17)
23	24		Cr	—34 618 (25)
22	25		Mn	—22 920 (c)
29	29	48	K	—32 220 (500)
28	20		Ca	—44 216 (4)
27	21		Sc	—44 498 (6)
26	22		Ti	—48 487,7 (14)
25	23		V	—44 472,8 (31)
24	24		Cr	—42 818 (7)
23	25		Mn	—29 170 (c)
29	20	49	Ca	—41 286 (5)
28	21		Sc	—46 555 (4)
27	22		Ti	—48 558,7 (14)
26	23		V	—47 956,9 (16)
25	24		Cr	—45 329,0 (26)
24	25		Mn	—37 613 (24)
23	26		Fe	—24 470 (160)
30	20	50	Ca	—39 572 (8)
29	21		Sc	—44 539 (16)
28	22		Ti	—51 432,1 (26)
27	23		V	—49 219,3 (16)
26	24		Cr	—50 258,0 (14)
25	25		Mn	—42 625,7 (17)
24	26		Fe	—34 430 (c)
30	21	51	Sc	—43 220 (20)
29	22		Ti	—49 733,0 (28)
28	23		V	—52 199,1 (14)
27	24		Cr	—51 447,8 (14)
26	25		Mn	—48 239,8 (14)
25	26		Fe	—40 228 (17)
24	27		Co	—27 230 (c)
31	21	52	Sc	—40 140 (c)
30	22		Ti	—49 469 (10)
29	23		V	—51 438,9 (17)
28	24		Cr	—55 415,3 (15)
27	25		Mn	—50 704,2 (24)
26	26		Fe	—48 332 (12)
25	27		Co	—34 230 (c)
31	22	53	Ti	—46 890 (100)
30	23		V	—51 863 (25)
29	24		Cr	—55 283,7 (16)
28	25		Mn	—54 687,4 (15)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
27	26		Fe	—50 944,2 (22)
26	27		Co	—42 640 (18)
25	28		Ni	—29 410 (180)
32	22	54	Ti	—45 330 (c)
31	23		V	—49 930 (100)
30	24		Cr	—56 931,3 (16)
29	25		Mn	—55 554,3 (18)
28	26		Fe	—56 251,4 (14)
27	27		Co	—48 009,6 (19)
26	28		Ni	—39 210 (c)
32	23	55	V	—49 010 (c)
31	24		Cr	—55 106,3 (17)
30	25		Mn	—57 710,0 (16)
29	26		Fe	—57 478,6 (15)
28	27		Co	—54 023,9 (16)
27	28		Ni	—45 334 (11)
26	29		Cu	—31 530 (c)
33	23	56	V	—46 210 (c)
32	24		Cr	—55 265 (30)
31	25		Mn	—56 908,8 (17)
30	26		Pe	—60 604,1 (14)
29	27		Co	—56 036,7 (24)
28	28		Ni	—53 902 (11)
27	29		Cu	—38 500 (c)
33	24	57	Cr	—52 790 (c)
32	25		Mn	—57 487 (8)
31	26		Fe	—60 179,0 (14)
30	27		Co	—59 342,4 (15)
29	28		Ni	—56 099 (7)
28	29		Cu	—47 620 (c)
27	30		Zn	—32 630 (130)
34	24	58	Cr	—52 050 (c)
33	25		Mn	—56 210 (100)
32	26		Fe	—62 151,8 (16)
31	27		Co	—59 844,0 (18)
30	28		Ni	—60 224,3 (15)
29	29		Cu	—51 661,7 (28)
28	30		Zn	—42 260 (c)
34	25	59	Mn	—55 478 (30)
33	26		Fe	—60 661,4 (26)
32	27		Co	—62 226,4 (15)
31	28		Ni	—61 152,9 (15)
30	29		Cu	—56 352,2 (21)
29	30		Zn	—47 590 (c)
35	25	60	Mn	—52 950 (c)
34	26		Fe	—61 437 (10)
33	27		Co	—61 646,6 (15)
32	28		Ni	—64 470,2 (15)
31	29		Cu	—58 343,3 (25)
30	30		Zn	—54 184 (11)
35	26	61	Fe	—59 010 (70)
34	27		Co	—62 897,0 (17)
33	28		Ni	—64 219,1 (15)
32	29		Cu	—61 980,7 (20)
31	30		Zn	—56 580 (200)
30	31		Ga	—47 750 (c)
36	26	62	Fe	—58 930 (50)
35	27		Co	—61 504 (14)
34	28		Ni	—66 745,4 (15)
33	29		Cu	—62 796 (5)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
32	30		Zn	—61 169 (10)
31	31		Ga	—51 770 (c)
37	27	63	Co	—61 850 (19)
36	28		Ni	—65 512,6 (115)
35	29		Cu	—65 578,5 (15)
34	30		Zn	—62 211,1 (22)
33	31		Ga	—56 690 (100)
32	32		Ge	—47 550 (c)
37	27	64	Co	—59 791 (20)
36	28		Ni	—67 097,9 (16)
35	29		Cu	—65 423,0 (17)
34	30		Zn	—66 001,2 (19)
33	31		Ga	—58 836 (8)
32	32		Ge	—54 430 (250)
37	28	65	Ni	—65 124,5 (17)
36	29		Cu	—67 261,5 (20)
35	30		Zn	—65 909,6 (20)
34	31		Ga	—62 653,8 (22)
33	32		Ge	—56 410 (100)
32	33		As	—47 150 (c)
38	28	66	Ni	—66 021 (19)
37	29		Cu	—66 256,7 (21)
36	30		Zn	—68 898,3 (16)
35	31		Ga	—63 723,3 (34)
34	32		Ge	—61 621 (13)
33	33		As	—51 520 (c)
39	28	67	Ni	—63 470 (90)
38	29		Cu	—67 305 (8)
37	30		Zn	—67 879,6 (16)
36	31		Ga	—66 878,5 (18)
35	32		Ge	—62 450 (50)
34	33		As	—56 650 (c)
33	34		Se	—47 080 (c)
39	29	68	Cu	—65 390 (50)
38	30		Zn	—70 006,3 (17)
37	31		Ga	—67 085,2 (21)
36	32		Ge	—66 972 (12)
35	33		As	—58 770 (c)
34	34		Se	—54 170 (c)
40	29	69	Cu	—65 940 (70)
39	30		Zn	—68 417,0 (18)
38	31		Ga	—69 321,5 (31)
37	32		Ge	—67 096 (4)
36	33		As	—63 120 (40)
35	34		Se	—56 300 (40)
34	35		Br	—45 620 (c)
41	29	70	Cu	—63 390 (110)
40	30		Zn	—69 559,9 (34)
39	31		Ga	—68 905,2 (32)
38	32		Ge	—70 561,4 (18)
37	33		As	—64 339 (20)
36	34		Se	—61 590 (200)
35	35		Br	—51 140 (c)
41	30	71	Zn	—67 324 (10)
40	31		Ga	—70 141,5 (26)
39	32		Ge	—69 905,8 (21)
38	33		As	—67 893 (4)
37	34		Se	—63 090 (c)
36	35		Br	—56 490 (c)
35	36		Kr	—46 500 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
42	30	72	Zn	—68 134 (6)
41	31		Ga	—68 591,0 (28)
40	32		Ge	—72 582,6 (20)
39	33		As	—68 232 (7)
38	34		Se	—67 894 (12)
37	35		Br	—58 930 (c)
36	36		Kr	—53 870 (c)
43	30	73	Zn	—65 030 (200)
42	31		Ga	—69 730 (40)
41	32		Ge	—71 293,5 (19)
40	33		As	—70 949 (4)
39	34		Se	—68 209 (11)
38	35		Br	—63 670 (220)
37	36		Kr	—56 980 (140)
44	30	74	Zn	—65 670 (140)
43	31		Ga	—68 020 (100)
42	32		Ge	—73 422,1 (19)
41	33		As	—70 859,7 (25)
40	34		Se	—72 212,7 (26)
39	35		Br	—65 295 (15)
38	36		Kr	—62 020 (100)
45	30	75	Zn	—62 460 (c)
44	31		Ga	—68 560 (200)
43	32		Ge	—71 856,1 (24)
42	33		As	—73 033,9 (23)
41	34		Se	—72 169,0 (24)
40	35		Br	—69 159 (20)
39	36		Kr	—64 160 (c)
38	37		Rb	—57 510 (600)
46	30	76	Zn	—62 550 (170)
45	31		Ga	—66 440 (150)
44	32		Ge	—73 213,5 (25)
43	33		As	—72 290,6 (23)
42	34		Se	—75 259,2 (25)
41	35		Br	—73 103 (15)
40	36		Kr	—69 100 (200)
39	37		Rb	—60 610 (270)
47	30	77	Zn	—58 910 (c)
46	31		Ga	—66 410 (c)
45	32		Ge	—71 214,3 (26)
44	33		As	—73 915,7 (37)
43	34		Se	—74 606,1 (25)
42	35		Br	—73 241,5 (38)
41	36		Kr	—70 236 (30)
40	37		Rb	—65 110 (120)
39	38		Sr	—57 960 (280)
48	30	78	Zn	—58 080 (320)
47	31		Ga	—63 680 (200)
46	32		Ge	—71 760 (70)
45	33		As	—72 740 (70)
44	34		Se	—77 031,5 (26)
43	35		Br	—73 458 (5)
42	36		Kr	—74 150 (8)
41	37		Rb	—67 090 (180)
40	38		Sr	—63 850 (c)
48	31	79	Ga	—62 810 (170)
47	32		Ge	—69 570 (150)
46	33		As	—73 720 (50)
45	34		Se	—75 920,6 (39)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
44	35		Br	—76 070,0 (36)
43	36		Kr	—74 439 (9)
42	37		Rb	—70 860 (110)
41	38		Sr	—65 460 (c)
49	31	80	Ga	—59 530 (c)
48	32		Ge	—69 430 (310)
47	33		As	—72 060 (300)
46	34		Se	—77 761,3 (35)
45	35		Br	—75 891,0 (36)
44	36		Kr	—77 897 (11)
43	37		Rb	—72 190 (23)
42	38		Sr	—70 390 (c)
49	32	81	Ge	—66 340 (c)
48	33		As	—72 640 (100)
47	34		Se	—76 391,0 (37)
46	35		Br	—77 976 (6)
45	36		Kr	—77 707 (18)
44	37		Rb	—75 445 (35)
43	38		Sr	—71 460 (50)
50	32	82	Ge	—65 790 (c)
49	33		As	—70 190 (c)
48	34		Se	—77 586 (10)
47	35		Br	—77 498 (6)
46	36		Kr	—80 591 (6)
45	37		Rb	—76 213 (20)
44	38		Sr	—75 999 (9)
43	39		Y	—67 910 (c)
50	33	83	As	—69 950 (220)
49	34		Se	—75 410 (32)
48	35		Br	—79 025 (15)
47	36		Kr	—79 984,6 (39)
46	37		Rb	—78 987 (32)
45	38		Sr	—76 737 (30)
44	39		Y	—72 440 (c)
51	33	84	As	—66 160 (c)
50	34		Se	—75 942 (18)
49	35		Br	—77 759 (26)
48	36		Kr	—82 431,9 (36)
47	37		Rb	—79 752 (4)
46	38		Sr	—80 641 (4)
45	39		Y	—73 692 (30)
44	40		Zr	—71 440 (c)
51	34	85	Se	—72 570 (c)
50	35		Br	—78 670 (100)
49	36		Kr	—81 471,8 (37)
48	37		Rb	—82 158,8 (33)
47	38		Sr	—81 095 (7)
46	39		Y	—77 835 (12)
45	40		Zr	—73 130 (c)
52	34	86	Se	—70 860 (c)
51	35		Br	—75 960 (400)
50	36		Kr	—83 263 (5)
49	37		Rb	—82 737,7 (32)
48	38		Sr	—84 512,1 (28)
47	39		Y	—79 239 (10)
46	40		Zr	—77 940 (c)
45	41		Nb	—69 340 (c)
52	35	87	Br	—74 210 (c)
51	36		Kr	—80 707 (5)
50	37		Rb	—84 595,7 (30)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
49	38		Sr	—84 868,9 (27)
48	39		Y	—83 007,2 (30)
47	40		Zr	—79 430 (80)
46	41		Nb	—74 430 (c)
53	35	88	Br	—71 090 (c)
52	36		Kr	—79 686 (14)
51	37		Rb	—82 602 (12)
50	38		Sr	—87 910,6 (27)
49	39		Y	—84 298 (4)
48	40		Zr	—83 621 (10)
47	41		Nb	—76 420 (c)
46	42		Mo	—72 920 (c)
53	36	89	Kr	—76 790 (60)
52	37		Rb	—81 717 (13)
51	38		Sr	—86 203 (4)
50	39		Y	—87 695,3 (30)
49	40		Zr	—84 859,5 (32)
48	41		Nb	—80 621 (19)
47	42		Mo	—75 220 (c)
54	36	90	Kr	—75 180 (70)
53	37		Rb	—79 570 (60)
52	38		Sr	—85 934,7 (38)
51	39		Y	—86 480,7 (33)
50	40		Zr	—88 764,6 (29)
49	41		Nb	—82 654 (5)
48	42		Mo	—80 167 (6)
47	43		Tc	—70 970 (c)
55	36	91	Kr	—71 770 (110)
54	37		Rb	—77 970 (40)
53	38		Sr	—83 666 (5)
52	39		Y	—86 349,5 (35)
51	40		Zr	—87 892,5 (29)
50	41		Nb	—86 636,9 (38)
49	42		Mo	—82 199 (12)
48	43		Tc	—75 980 (200)
56	36	92	Kr	—69 150 (220)
55	37		Rb	—75 120 (200)
54	38		Sr	—82 892 (34)
53	39		Y	—84 822 (16)
52	40		Zr	—88 456,1 (28)
51	41		Nb	—86 448,1 (34)
50	42		Mo	—86 807 (4)
49	43		Tc	—78 936 (26)
57	36	93	Kr	—64 920 (c)
56	37		Rb	—72 920 (170)
55	38		Sr	—80 280 (150)
54	39		Y	—84 227 (20)
53	40		Zr	—87 116,7 (28)
52	41		Nb	—87 209,0 (29)
51	42		Mo	—86 803 (4)
50	43		Tc	—83 610 (5)
49	44		Ru	—77 310 (c)
57	37	94	Rb	—69 460 (c)
56	38		Sr	—78 960 (70)
55	39		Y	—82 382 (12)
54	40		Zr	—87 263,9 (31)
53	41		Nb	—86 367,1 (30)
52	42		Mo	—88 412,3 (34)
51	43		Tc	—84 156 (6)
50	44		Ru	—82 571 (13)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
58	37	95	Rb	—66 550 (310)
57	38		Sr	—75 140 (90)
56	39		Y	—81 233 (20)
55	40		Zr	—85 663,4 (34)
54	41		Nr	—86 786,5 (25)
53	42		Mo	—87 712,1 (24)
52	43		Tc	—86 013 (8)
51	44		Ru	—83 452 (12)
50	45		Rh	—78 340 (150)
59	37	96	Rb	—62 770 (c)
58	38		Sr	—73 070 (140)
57	39		Y	—78 430 (100)
56	40		Zr	—85 444,7 (37)
55	41		Nb	—85 608 (5)
54	42		Mo	—88 794,9 (24)
53	43		Tc	—85 821 (6)
52	44		Ru	—86 075 (9)
51	45		Rh	—79 633 (13)
59	38	97	Sr	—69 080 (c)
58	39		Y	—76 280 (130)
57	40		Zr	—82 954,2 (37)
56	41		Nb	—85 611,6 (31)
55	42		Mo	—85 544,5 (24)
54	43		Tc	—87 224 (5)
53	44		Ru	—86 070 (100)
52	45		Rh	—82 560 (100)
51	46		Pd	—77 760 (c)
60	38	98	Sr	—67 380 (c)
59	39		Y	—73 190 (c)
58	40		Zr	—81 291 (20)
57	41		Nb	—83 530 (6)
56	42		Mo	—88 115,4 (24)
55	43		Tc	—86 434 (6)
54	44		Ru	—88 226 (6)
53	45		Rh	—83 168 (12)
52	46		Pd	—81 270 (c)
60	39	99	Y	—71 500 (220)
59	40		Zr	—77 890 (100)
58	41		Nb	—82 346 (16)
57	42		Mo	—85 969,5 (24)
56	43		Tc	—87 326,2 (25)
55	44		Ru	—87 619,8 (26)
54	45		Rh	—85 517 (10)
53	46		Pd	—82 112 (23)
52	47		Ag	—76 510 (c)
60	40	100	Zr	—76 600 (200)
59	41		Nb	—79 960 (130)
58	42		Mo	—86 189 (6)
57	43		Tc	—86 018,8 (27)
56	44		Ru	—89 221,6 (26)
55	45		Rh	—85 592 (20)
54	46		Pd	—85 230 (15)
53	47		Ag	—77 930 (400)
61	40	101	Zr	—73 050 (c)
60	41		Nb	—78 950 (100)
59	42		Mo	—83 516 (6)
58	43		Tc	—86 327 (24)
57	44		Ru	—87 951,6 (29)
56	45		Rh	—87 410 (18)
55	46		Pd	—85 428 (18)
54	47		Ag	—81 330 (c)
53	48		Cd	—75 530 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
61	41	102	Nb	—76 360 (c)
60	42		Mo	—83 562 (21)
59	43		Tc	—84 600 (c)
58	44		Ru	—89 100,5 (29)
57	45		Rh	—86 777 (7)
56	46		Pd	—87 925 (9)
55	47		Ag	—82 330 (50)
54	48		Cd	—79 430 (c)
53	49		In	—70 130 (c)
62	41	103	Nb	—75 410 (c)
61	42		Mo	—80 610 (c)
60	43		Tc	—84 910 (100)
59	44		Ru	—87 261,4 (30)
58	45		Rh	—88 024 (4)
57	46		Pd	—87 478 (9)
56	47		Ag	—84 800 (50)
55	48		Cd	—80 600 (140)
54	49		In	—74 100 (c)
62	42	104	Mo	—80 500 (c)
61	43		Tc	—82 700 (c)
60	44		Ru	—88 099 (6)
59	45		Rh	—86 952 (4)
58	46		Pd	—89 400 (5)
57	47		Ag	—85 150 (30)
56	48		Cd	—83 850 (c)
55	49		In	—75 850 (c)
54	50		Sn	—71 150 (c)
63	42	105	Mo	—77 140 (c)
62	43		Tc	—82 540 (200)
61	44		Ru	—85 938 (6)
60	45		Rh	—87 855 (6)
59	46		Pd	—88 422 (5)
58	47		Ag	—87 075 (10)
57	48		Cd	—84 336 (11)
56	49		In	—79 340 (c)
55	50		Sn	—73 090 (c)
63	43	106	Tc	—80 030 (c)
62	44		Ru	—86 333 (10)
61	45		Rh	—86 372 (10)
60	46		Pd	—89 913 (5)
59	47		Ag	—86 929 (6)
58	48		Cd	—87 131 (6)
57	49		In	—80 586 (31)
56	50		Sn	—76 990 (c)
55	51		Sb	—66 190 (c)
64	43	107	Ts	—79 510 (c)
63	44		Ru	—83 710 (300)
62	45		Rh	—86 860 (40)
61	46		Pd	—88 371 (6)
60	47		Ag	—88 404 (6)
59	48		Cd	—86 987 (7)
58	49		In	—83 500 (150)
57	50		Sn	—78 400 (c)
56	51		Sb	—70 400 (c)
64	44	108	Ru	—83 820 (600)
63	45		Rh	—85 020 (600)
62	46		Pd	—89 523 (5)
61	47		Ag	—87 602 (6)
60	48		Cd	—89 251 (6)
59	49		In	—84 100 (80)
58	50		Sn	—81 900 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
57	51		Sb	—72 400 (c)
56	52		Te	—65 320 (c)
65	44	109	Ru	—80 810 (c)
64	45		Rh	—85 110 (c)
63	46		Pd	—87 606 (5)
62	47		Ag	—88 722 (4)
61	48		Cd	—88 540 (5)
60	49		In	—86 524 (10)
59	50		Sn	—82 620 (c)
58	51		Sb	—76 120 (c)
57	52		Te	—67 470 (c)
65	45	110	Rh	—82 930 (100)
64	46		Pd	—88 335 (20)
63	47		Ag	—87 456 (4)
62	48		Cd	—90 349 (4)
61	49		In	—86 409 (30)
60	50		Sn	—85 834 (16)
59	51		Sb	—77 430 (c)
58	52		Te	—71 760 (c)
66	45	111	Rh	—82 530 (c)
65	46		Pd	—86 030 (50)
64	47		Ag	—88 226 (5)
63	48		Cd	—89 254 (4)
62	49		In	—88 405 (11)
61	50		Sn	—85 941 (8)
60	51		Sb	—80 840 (c)
59	52		Te	—73 470 (70)
66	46	112	Pd	—86 326 (26)
65	47		Ag	—86 620 (29)
64	48		Cd	—90 577,9 (34)
63	49		In	—88 000 (7)
62	50		Sn	—88 658 (6)
61	51		Sb	—81 740 (100)
60	52		Te	—77 550 (c)
59	53		I	—67 440 (c)
67	46	113	Pd	—83 640 (c)
66	47		Ag	—87 040 (20)
65	48		Cd	—89 050,3 (35)
64	49		In	—89 372 (5)
63	50		Sn	—88 332 (5)
62	51		Sb	—84 443 (32)
61	52		Te	—78 540 (c)
60	53		I	—71 440 (c)
67	47	114	Ag	—85 160 (140)
66	48		Cd	—90 019,6 (33)
65	49		In	—88 576 (5)
64	50		Sn	—90 560 (4)
63	51		Sb	—84 870 (50)
62	52		Te	—82 190 (c)
61	53		I	—73 070 (c)
60	54		Xe	—67 090 (c)
68	47	115	Ag	—84 910 (100)
67	48		Cd	—88 093 (8)
66	49		In	—86 541 (8)
65	50		Sn	—90 035,1 (37)
64	51		Sb	—87 005 (20)
63	52		Te	—82 420 (50)
62	53		I	—76 620 (c)
61	54		Xe	—68 700 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
69	47	116	Ag	—82 620 (c)
68	48		Cd	—88 717,6 (37)
67	49		In	—88 253 (8)
66	50		Sn	—91 526,1 (36)
65	51		Sb	—86 930 (40)
64	52		Te	—85 370 (110)
63	53		I	—77 610 (170)
62	54		Xe	—73 270 (200)
61	55		Cs	—62 630 (c)
70	47	117	Ag	—82 240 (100)
69	48		Cd	—86 416 (13)
68	49		In	—88 944 (9)
67	50		Sn	—90 398,9 (35)
66	51		Sb	—88 654 (18)
65	52		Te	—85 164 (35)
64	53		I	—80 850 (110)
63	54		Xe	—74 480 (c)
62	55		Cs	—66 850 (c)
70	48	118	Cd	—86 707 (20)
69	49		In	—87 450 (300)
68	50		Sn	—91 653,6 (35)
67	51		Sb	—87 967 (5)
66	52		Te	—87 671 (24)
65	53		I	—81 370 (c)
64	54		Xe	—78 070 (c)
63	55		Cs	—68 670 (c)
71	48	119	Cd	—84 230 (300)
70	49		In	—87 730 (18)
69	50		Sn	—90 066,7 (35)
68	51		Sb	—89 483 (12)
67	52		Te	—87 189 (13)
66	53		I	—83 820 (100)
65	54		Xe	—78 830 (160)
64	55		Cs	—72 530 (c)
63	56		Ba	—64 530 (c)
72	48	120	Cd	—83 981 (30)
71	49		In	—85 700 (100)
70	50		Sn	—91 101,8 (35)
69	51		Sb	—88 421 (8)
68	52		Te	—89 404 (21)
67	53		I	—84 000 (200)
66	54		Xe	—82 050 (280)
65	55		Cs	—73 640 (320)
64	56		Ba	—69 050 (c)
72	49	121	In	—85 842 (28)
71	50		Sn	—89 201,8 (35)
70	51		Sb	—89 588,4 (35)
69	52		Te	—88 508 (15)
68	53		I	—86 140 (40)
67	54		Xe	—82 350 (110)
66	55		Cs	—77 150 (c)
65	56		Ba	—70 570 (410)
73	49	122	In	—83 600 (150)
72	50		Sn	—89 946 (4)
71	51		Sb	—88 323,3 (36)
70	52		Te	—90 304 (4)
69	53		I	—86 160 (40)
68	54		Xe	—85 160 (c)
67	55		Cs	—78 010 (c)
66	56		Ba	—74 260 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
74	49	123	In	—83 440 (40)
73	50		Sn	—87 821 (4)
72	51		Sb	—89 217,5 (38)
71	52		Te	—89 165,5 (38)
70	53		I	—87 970 (100)
69	54		Xe	—85 290 (100)
68	55		Cs	—80 890 (c)
67	56		Ba	—75 390 (c)
75	49	124	In	—81 100 (90)
74	50		Sn	—88 240 (5)
73	51		Sb	—87 613,4 (38)
72	52		Te	—90 518,3 (38)
71	53		I	—87 361 (5)
70	54		Xe	—87 450 (140)
69	55		Cs	—81 530 (480)
68	56		Ba	—78 750 (c)
76	49	125	In	—80 500 (300)
75	50		Sn	—85 902 (5)
74	51		Sb	—88 252 (5)
73	52		Te	—89 019 (4)
72	53		I	—88 841 (5)
71	54		Xe	—87 110 (40)
70	55		Cs	—84 040 (40)
69	56		Ba	—79 460 (250)
77	49	126	In	—77 900 (120)
76	50		Sn	—86 024 (12)
75	51		Sb	—86 402 (32)
74	52		Te	—90 066 (4)
73	53		I	—87 911 (6)
72	54		Xe	—89 162 (8)
71	55		Cs	—84 330 (140)
70	56		Ba	—52 560 (c)
78	49	127	In	—77 170 (130)
77	50		Sn	—83 600 (100)
76	51		Sb	—86 704 (7)
75	52		Te	—88 285 (5)
74	53		I	—88 980 (5)
73	54		Xe	—88 316 (6)
72	55		Cs	—86 206 (21)
71	56		Ba	—82 760 (100)
70	57		La	—77 760 (c)
79	49	128	In	—74 340 (250)
78	50		Sn	—83 440 (150)
77	51		Sb	—84 730 (150)
76	52		Te	—88 992,3 (39)
75	53		I	—87 734 (5)
74	54		Xe	—89 861,2 (16)
73	55		Cs	—85 935 (6)
72	56		Ba	—85 482 (20)
71	57		La	—78 680 (c)
80	49	129	In	—73 120 (180)
79	50		Sn	—80 640 (130)
78	51		Sb	—84 630 (22)
77	52		Te	—87 007 (4)
76	53		I	—88 505 (4)
75	54		Xe	—88 697,5 (20)
74	55		Cs	—87 563 (24)
73	56		Ba	—85 116 (19)
72	57		La	—81 120 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
81	49	130	In	—70 080 (c)
80	50		Sn	—80 380 (130)
79	51		Sb	—82 380 (80)
78	52		Te	—87 348 (5)
77	53		I	—86 897 (10)
76	54		Xe	—89 881,1 (16)
75	55		Cs	—86 863 (12)
74	56		Ba	—87 303 (12)
73	57		La	—81 600 (c)
81	50	131	Sn	—77 480 (c)
80	51		Sb	—82 100 (c)
79	52		Te	—85 201 (5)
78	53		I	—87 451 (5)
77	54		Xe	—88 421 (5)
76	55		Cs	—88 066 (8)
75	56		Ba	—86 726 (19)
74	57		La	—83 770 (100)
73	58		Ce	—79 470 (c)
82	50	132	Sn	—76 390 (220)
81	51		Sb	—79 610 (200)
80	52		Te	—85 213 (21)
79	53		I	—85 706 (21)
78	54		Xe	—89 286 (5)
77	55		Cs	—87 175 (23)
76	56		Ba	—88 453 (10)
75	57		La	—83 740 (50)
74	58		Ce	—82 340 (c)
82	51	133	Sb	—78 980 (210)
81	52		Te	—82 930 (70)
80	53		I	—85 902 (31)
79	54		Xe	—87 662 (9)
78	55		Cs	—88 089 (8)
77	56		Ba	—87 569 (9)
76	57		La	—85 570 (c)
75	58		Ce	—82 170 (c)
74	59		Pr	—77 970 (c)
83	51	134	Sb	—73 870 (c)
82	52		Te	—82 670 (c)
81	53		I	—83 970 (60)
80	54		Xe	—88 125 (7)
79	55		Cs	—86 909 (8)
78	56		Ba	—88 968 (8)
77	57		La	—85 268 (31)
76	58		Ce	—84 770 (c)
75	59		Pr	—78 470 (c)
83	52	135	Te	—77 600 (250)
82	53		I	—83 796 (29)
81	54		Xe	—86 506 (11)
80	55		Cs	—87 665 (9)
79	56		Ba	—87 870 (7)
78	57		La	—86 670 (12)
77	58		Ce	—84 550 (100)
76	59		Pr	—80 990 (140)
75	60		Nd	—76 290 (c)
84	52	136	Te	—74 830 (c)
83	53		I	—79 430 (100)
82	54		Xe	—86 425 (8)
81	55		Cs	—86 358 (8)
80	56		Ba	—88 906 (7)
79	57		La	—86 040 (70)
78	58		Ce	—86 500 (40)
77	59		Pr	—81 400 (60)
76	60		Nd	—79 190 (70)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
84	53	137	I	—76 720 (200)
83	54		Xe	—82 215 (22)
82	55		Cs	—86 560 (7)
81	56		Ba	—87 733 (7)
80	57		La	—87 130 (c)
79	58		Ce	—85 910 (c)
78	59		Pr	—83 210 (c)
77	60		Nd	—79 410 (c)
76	61		Pm	—74 210 (c)
85	53	138	I	—71 730 (c)
84	54		Xe	—80 030 (c)
83	55		Cs	—82 770 (c)
82	56		Ba	—88 273 (7)
81	57		La	—86 524 (7)
80	58		Ce	—87 565 (13)
79	59		Pr	—83 128 (16)
78	60		Nd	—82 030 (c)
77	61		Pm	—75 030 (c)
85	54	139	Xe	—75 750 (90)
84	55		Cs	—80 630 (70)
83	56		Ba	—84 925 (7)
82	57		La	—87 231 (6)
81	58		Ce	—86 966 (8)
80	59		Pr	—84 854 (13)
79	60		Nd	—82 050 (50)
78	61		Pm	—77 500 (210)
77	62		Sm	—72 300 (450)
86	54	140	Xe	—73 180 (260)
85	55		Cs	—77 240 (250)
84	56		Ba	—83 285 (12)
83	57		La	—84 320 (6)
82	58		Ce	—88 081 (6)
81	59		Pr	—84 693 (8)
80	60		Nd	—84 220 (40)
79	61		Pm	—78 180 (110)
78	62		Sm	—75 480 (c)
87	54	141	Xe	—69 000 (140)
86	55		Cs	—75 000 (100)
85	56		Ba	—79 980 (60)
84	57		La	—83 008 (31)
83	58		Ce	—85 438 (6)
82	59		Pr	—86 018 (6)
81	60		Nd	—84 203 (10)
80	61		Pm	—80 470 (40)
79	62		Sm	—75 910 (60)
78	63		Eu	—69 880 (100)
88	54	142	Xe	—66 050 (170)
87	55		Cs	—70 950 (130)
86	56		Ba	—77 820 (100)
85	57		La	—80 018 (9)
84	58		Ce	—84 535 (6)
83	59		Pr	—83 790 (6)
82	60		Nd	—85 949 (5)
81	61		Pm	—81 060 (60)
80	62		Sm	—78 978 (16)
79	63		Eu	—71 480 (c)
88	55	143	Cs	—68 360 (c)
87	56		Ba	—74 010 (c)
86	57		La	—78 310 (80)
85	58		Ce	—81 610 (6)
84	59		Pr	—83 065 (6)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
83	60		Nd	—84 000 (5)
82	61		Pm	—82 959 (7)
81	62		Sm	—79 511 (11)
80	63		Eu	—74 410 (50)
79	64		Gd	—68 510 (c)
89	55	144	Cs	—63 930 (c)
88	56		Ba	—72 030 (c)
87	57		La	—74 930 (c)
86	58		Ce	—80 431 (6)
85	59		Pr	—80 750 (6)
84	60		Nd	—83 746 (5)
83	61		Pm	—81 416 (7)
82	62		Sm	—81 964 (6)
81	63		Eu	—75 636 (30)
80	64		Gd	—71 940 (c)
90	55	145	Cs	—61 720 (c)
89	56		Ba	—67 820 (c)
88	57		La	—72 920 (c)
87	58		Ce	—77 120 (90)
86	59		Pr	—79 625 (11)
85	60		Nd	—81 430 (5)
84	61		Pm	—81 270 (6)
83	62		Sm	—80 656 (6)
82	63		Eu	—77 936 (16)
81	64		Gd	—72 940 (c)
80	65		Tb	—66 240 (c)
90	56	146	Ba	—65 560 (c)
89	57		La	—69 460 (c)
88	58		Ce	—75 760 (120)
87	59		Pr	—76 840 (100)
86	60		Nd	—80 923 (5)
85	61		Pm	—79 442 (8)
84	62		Sm	—80 984 (8)
83	63		Eu	—77 111 (11)
82	64		Gd	—75 910 (c)
81	65		Tb	—67 810 (c)
90	57	147	La	—67 540 (c)
89	58		Ce	—72 240 (т)
88	59		Pr	—75 440 (200)
87	60		Nd	—78 144 (5)
86	61		Pm	—79 040 (5)
85	62		Sm	—79 265 (5)
84	63		Eu	—77 535 (8)
83	64		Gd	—75 207 (26)
22	65		Tb	—70 510 (c)
81	66		Dy	—64 210 (c)
90	58	148	Ce	—70 710 (c)
89	59		Pr	—72 510 (c)
88	60		Nd	—77 407 (5)
87	61		Pm	—76 870 (10)
86	62		Sm	—79 335 (5)
85	63		Eu	—76 235 (22)
84	64		Gd	—76 268 (6)
83	65		Tb	—70 640 (80)
82	66		Dy	—67 770 (c)
91	58	149	Ce	—67 470 (c)
90	59		Pr	—71 310 (200)
89	60		Nb	—74 374 (5)
88	61		Pm	—76 063 (6)
87	62		Sm	—77 135 (5)
86	63		Eu	—76 439 (7)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
85	64		Gd	—75 131 (7)
84	65		Tb	—71 434 (16)
83	66		Dy	—67 530 (c)
82	67		Ho	—61 530 (c)
91	59	150	Pr	—68 680 (c)
90	60		Nd	—73 682 (6)
89	61		Pm	—73 550 (80)
88	62		Sm	—77 049 (5)
87	63		Eu	—74 756 (11)
86	64		Gd	—75 765 (11)
85	65		Tb	—71 098 (11)
84	66		Dy	—69 140 (c)
83	67		Ho	—62 040 (c)
82	68		Er	—57 940 (c)
92	59	151	Pr	—67 440 (c)
91	60		Nd	—70 945 (6)
90	61		Pm	—73 386 (11)
89	62		Sm	—74 574 (5)
88	63		Eu	—74 650 (5)
87	64		Gd	—74 168 (9)
86	65		Tb	—71 608 (8)
85	66		Dy	—68 601 (27)
84	67		Ho	—63 440 (c)
83	68		Er	—58 200 (c)
82	69		Tm	—50 800 (c)
92	60	152	Nd	—70 146 (31)
91	61		Pm	—71 290 (130)
90	62		Sm	—74 761 (5)
89	63		Eu	—72 884 (5)
88	64		Gd	—74 703 (6)
87	65		Tb	—70 853 (16)
86	66		Dy	—70 116 (8)
85	67		Ho	—63 710 (80)
84	68		Er	—60 410 (c)
83	69		Tm	—51 810 (c)
93	60	153	Nd	—67 360 (c)
92	61		Pm	—70 760 (100)
91	62		Sm	—72 557 (5)
90	63		Eu	—73 363 (6)
89	64		Gd	—73 119 (6)
88	65		Tb	—71 329 (9)
87	66		Dy	—69 155 (8)
86	67		Ho	—64 954 (34)
85	68		Er	—60 310 (c)
84	69		Tm	—53 870 (c)
83	70		Yb	—47 210 (c)
93	61	154	Pm	—68 450 (100)
92	62		Sm	—72 454 (5)
91	63		Eu	—71 726 (7)
90	64		Gd	—73 704 (5)
89	65		Tb	—70 240 (50)
88	66		Dy	—70 392 (12)
87	67		Ho	—64 635 (c)
86	68		Er	—62 440 (c)
85	69		Tm	—54 530 (c)
84	70		Yb	—50 050 (c)
94	61	155	Pm	—67 100 (c)
93	62		Sm	—70 196 (5)
92	63		Eu	—71 825 (6)
91	64		Gd	—72 071 (5)
90	65		Tb	—71 256 (15)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
89	66		Dy	—69 157 (13)
88	67		Ho	—66 055 (24)
87	68		Er	—62 057 (27)
86	69		Tm	—56 450 (с)
85	70		Yb	—50 450 (с)
84	71		Lu	—42 600 (с)
94	62	156	Sm	—69 368 (14)
93	63		Eu	—70 083 (11)
92	64		Gd	—72 536 (5)
91	65		Tb	—70 098 (7)
90	66		Dy	—70 527 (9)
89	67		Ho	—65 410 (с)
88	68		Er	—63 930 (с)
87	69		Tm	—56 940 (80)
86	70		Yb	—53 060 (с)
85	71		Lu	—43 810 (с)
95	62	157	Sm	—66 860 (200
94	63		Eu	—69 465 (16)
93	64		Gd	—70 825 (5)
92	65		Tb	—70 767 (6)
91	66		Dy	—69 425 (9)
90	67		Ho	—66 890 (50)
89	68		Er	—63 090 (с)
88	69		Tm	—58 490 (с)
87	70		Yb	—53 270 (с)
86	71		Lu	—46 470 (с)
85	72		Hf	—38 960 (с)
95	63	158	Eu	—67 240 (80)
94	64		Gd	—70 691 (5)
93	65		Tb	—69 475 (6)
92	66		Dy	—70 410 (6)
91	67		Ho	—66 433 (8)
90	68		Er	—65 030 (с)
89	69		Tm	—58 430 (с)
88	70		Yb	—55 530 (с)
87	71		Lu	—47 230 (с)
86	72		Hf	—42 220 (с)
96	63	159	Eu	—65 930 (50)
95	64		Gd	—68 562 (6)
94	65		Tb	—69 536 (6)
93	66		Dy	—69 171 (6)
92	67		Ho	—67 318 (11)
91	68		Er	—64 390 (100)
90	69		Tm	—60 190 (с)
89	70		Yb	—55 290 (с)
88	71		Lu	—49 490 (с)
87	72		Hf	—42 800 (с)
97	63	160	Eu	—63 540 (с)
96	64		Gd	—67 943 (5)
95	65		Tb	—67 840 (6)
94	66		Dy	—69 774 (6)
93	67		Ho	—66 388 (16)
92	68		Er	—66 052 (29)
91	69		Tm	—60 130 (60)
90	70		Yb	—57 550 (с)
89	71		Lu	—49 930 (с)
88	72		Hf	—45 750 (с)
87	73		Ta	—35 780 (с)
97	64	161	Gd	—65 507 (6)
96	65		Tb	—67 466 (6)
95	66		Dy	—68 056 (6)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
94	67		Ho	—67 203 (6)
93	68		Er	—65 197 (12)
92	69		Tm	—61 680 (с)
91	70		Yb	—57 400 (с)
90	71		Lu	—52 080 (с)
89	72		Hf	—46 130 (с)
88	73		Ta	—38 840 (с)
98	64	162	Cd	—64 360 (120)
97	65		Tb	—65 760 (70)
96	66		Dy	—68 181 (6)
95	67		Ho	—66 047 (7)
94	68		Er	—66 335 (6)
93	69		Tm	—61 540 (60)
92	70		Yb	—59 340 (с)
91	71		Lu	—52 340 (с)
90	72		Hf	—48 760 (с)
89	73		Ta	—39 710 (с)
88	74		W	—34 130 (с)
98	65	163	Tb	—64 680 (50)
97	66		Dy	—66 382 (6)
96	67		Ho	—66 379 (6)
95	68		Er	—65 168 (7)
94	69		Tm	—62 770 (с)
93	70		Yb	—59 170 (с)
92	71		Lu	—54 370 (с)
91	72		Hf	—48 770 (с)
90	73		Ta	—42 370 (с)
89	74		W	—34 850 (с)
99	65	164	Tb	—62 110 (150)
98	66		Dy	—65 967 (6)
97	67		Ho	—64 937 (6)
96	68		Er	—65 940 (6)
95	69		Tm	—61 978 (21)
94	70		Yb	—60 880 (с)
93	71		Lu	—54 580 (с)
92	72		Hf	—51 280 (с)
91	73		Ta	—43 080 (с)
90	74		W	—38 040 (с)
99	66	165	Dy	—63 611 (6)
98	67		Ho	—64 896 (6)
97	68		Er	—64 518 (6)
96	69		Tm	—62 924 (6)
95	70		Yb	—60 161 (21)
94	71		Lu	—56 160 (с)
93	72		Hf	—51 260 (с)
92	73		Ta	—45 360 (с)
91	74		W	—38 670 (с)
100	66	166	Dy	—62 583 (8)
99	67		Ho	—63 067 (6)
98	68		Er	—64 921 (6)
97	69		Tm	—61 874 (13)
96	70		Yb	—61 582 (9)
95	71		Lu	—56 100 (160)
94	72		Hf	—53 480 (с)
93	73		Ta	—46 100 (с)
92	74		W	—41 480 (с)
100	67	167	Ho	—62 316 (21)
99	68		Er	—63 286 (6)
98	69		Tm	—62 537 (6)
97	70		Yb	—60 583 (7)
96	71		Lu	—57 450 (70)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
95	72		Hf	—53 150 (c)
94	73		Ta	—47 950 (c)
93	74		W	—41 950 (c)
92	75		Re	—34 650 (c)
101	67	168	Ho	—60 270 (100)
100	68		Er	—62 985 (6)
99	69		Tm	—61 306 (6)
98	70		Yb	—61 565 (7)
97	71		Lu	—57 100 (80)
96	72		Hf	—55 100 (c)
95	73		Ta	—48 400 (c)
94	74		W	—44 500 (c)
93	75		Re	—35 700 (c)
102	67	169	Ho	—58 793 (21)
101	68		Er	—60 917 (6)
100	69		Tm	—61 269 (6)
99	70		Yb	—60 361 (7)
98	71		Lu	—57 881 (26)
97	72		Hf	—54 530 (100)
96	73		Ta	—50 030 (c)
95	74		W	—44 890 (c)
94	75		Re	—38 130 (c)
93	76		Os	—30 550 (c)
103	67	170	Ho	—56 100 (200)
102	68		Er	—60 104 (6)
101	69		Tm	—59 791 (6)
100	70		Yb	—60 759 (6)
99	71		Lu	—57 319 (21)
98	72		Hf	—56 120 (c)
97	73		Ta	—50 120 (c)
96	74		W	—46 920 (c)
95	75		Re	—38 920 (c)
94	76		Os	—33 530 (c)
103	68	171	Er	—57 714 (6)
102	69		Tm	—59 205 (6)
101	70		Yb	—59 302 (6)
100	71		Lu	—57 821 (6)
99	72		Hf	—55 300 (c)
98	73		Ta	—51 600 (c)
97	74		W	—46 900 (c)
96	75		Re	—41 100 (c)
95	76		Os	—34 160 (c)
94	77		Ir	—26 180 (c)
104	68	172	Er	—56 491 (13)
103	69		Tm	—57 380 (11)
102	70		Yb	—59 250 (6)
101	71		Lu	—56 726 (6)
100	72		Hf	—56 330 (c)
99	73		Ta	—51 410 (c)
98	74		W	—48 810 (c)
97	75		Re	—41 510 (c)
96	76		Os	—36 840 (c)
95	77		Ir	—27 320 (c)
105	68	173	Er	—53 730 (200)
104	69		Tm	—56 226 (31)
103	70		Yb	—57 546 (6)
102	71		Lu	—56 871 (6)
101	72		Hf	—55 270 (c)
100	73		Ta	—52 370 (c)
99	74		W	—48 470 (c)
98	75		Re	—43 370 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы кэВ
97	76		Os	—37 410 (c)
96	77		Ir	—29 910 (c)
95	78		Pt	—21 790 (c)
105	69	174	Tm	—53 850 (50)
104	70		Yb	—56 940 (6)
103	71		Lu	—55 562 (6)
102	72		Hf	—55 830 (8)
101	73		Ta	—51 980 (80)
100	74		W	—50 080 (c)
99	75		Re	—43 580 (c)
98	76		Os	—39 620 (c)
97	77		Ir	—30 890 (c)
96	78		Pt	—24 930 (c)
106	69	175	Tm	—52 290 (50)
105	70		Yb	—54 691 (6)
104	71		Lu	—55 159 (5)
103	72		Hf	—54 548 (10)
102	73		Ta	—52 350 (c)
101	74		W	—49 450 (c)
100	75		Re	—45 150 (c)
99	76		Os	—39 710 (c)
98	77		Ir	—33 160 (c)
97	78		Pt	—25 640 (c)
96	79		Au	—17 160 (c)
107	69	176	Tm	—49 590 (c)
106	70		Yb	—53 490 (6)
105	71		Lu	—53 381 (5)
104	72		Hf	—54 567 (6)
103	73		Ta	—51 470 (100)
102	74		W	—50 570 (c)
101	75		Re	—44 970 (c)
100	76		Os	—41 810 (c)
99	77		Ir	—33 840 (c)
98	78		Pt	—28 540 (c)
97	79		Au	—18 400 (c)
107	70	177	Yb	—50 986 (6)
106	71		Lu	—52 382 (5)
105	72		Hf	—52 879 (6)
104	73		Ta	—51 721 (7)
103	74		W	—49 720 (c)
102	75		Re	—46 120 (c)
101	76		Os	—41 620 (c)
100	77		Ir	—35 820 (c)
99	78		Pt	—29 350 (c)
98	79		Au	—21 190 (c)
97	80		Hg	—12 650 (c)
108	70	178	Yb	—49 660 (50)
107	71		Lu	—50 300 (40)
106	72		Hf	—52 434 (6)
105	73		Ta	—50 520 (100)
104	74		W	—50 430 (100)
103	75		Re	—45 770 (210)
102	76		Os	—43 350 (c)
101	77		Ir	—36 270 (c)
100	78		Pt	—31 630 (c)
99	79		Au	—22 410 (c)
98	80		Hg	—15 930 (c)
108	71	179	Lu	—49 110 (40)
107	72		Hf	—50 462 (6)
106	73		Ta	—50 347 (8)
105	74		W	—49 283 (17)
104	75		Re	—46 590 (50)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
103	76		Os	—42 890 (c)
102	77		Ir	—37 890 (c)
101	78		Pt	—32 010 (c)
100	79		Au	—24 750 (c)
99	80		Hg	—16 800 (c)
109	71	180	Lu	—46 680 (70)
108	72		Hf	—49 779 (6)
107	73		Ta	—48 914 (13)
106	74		W	—49 624 (8)
105	75		Re	—45 829 (31)
104	76		Os	—44 220 (c)
103	77		Ir	—37 930 (c)
102	78		Pt	—34 120 (c)
101	79		Au	—25 630 (c)
100	80		Hg	—19 860 (c)
109	72	181	Hf	—47 403 (6)
108	73		Ta	—48 425 (6)
107	74		W	—48 237 (9)
106	75		Re	—46 440 (c)
105	76		Os	—43 410 (c)
104	77		Ir	—39 340 (c)
103	78		Pt	—34 060 (c)
102	79		Au	—27 640 (c)
101	80		Hg	—20 790 (c)
110	72	182	Hf	—45 990 (50)
109	73		Ta	—46 417 (6)
108	74		W	—48 228 (6)
107	75		Re	—45 430 (c)
106	76		Os	—44 580 (c)
105	77		Ir	—38 980 (c)
104	78		Pt	—35 980 (c)
103	79		Au	—28 180 (c)
102	80		Hg	—23 210 (c)
111	72	183	Hf	—43 269 (32)
110	73		Ta	—45 279 (12)
109	74		W	—46 347 (6)
108	75		Re	—45 791 (10)
107	76		Os	—43 490 (c)
106	77		Ir	—40 090 (c)
105	78		Pt	—35 630 (c)
104	79		Au	—30 010 (c)
103	80		Hg	—23 690 (c)
102	81		Tl	—15 830 (c)
112	72	184	Hf	—41 480 (60)
111	73		Ta	—42 821 (27)
110	74		W	—45 687 (7)
109	75		Re	—44 191 (9)
108	76		Os	—44 233 (7)
107	77		Ir	—39 510 (250)
106	78		Pt	—37 210 (c)
105	79		Au	—30 220 (c)
104	80		Hg	—26 040 (c)
103	81		Tl	—16 900 (c)
112	73	185	Ta	—41 360 (21)
111	74		W	—43 370 (7)
110	75		Re	—43 802 (7)
109	76		Os	—42 787 (7)
108	77		Ir	—40 290 (c)
107	78		Pt	—36 490 (c)
106	79		Au	—31 730 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
105	80		Hg	—26 140 (c)
104	81		Tl	—19 110 (c)
103	82		Pb	—11 740 (c)
113	73	186	Ta	—38 600 (60)
112	74		W	—42 498 (7)
111	75		Re	—41 910 (7)
110	76		Os	—42 987 (7)
109	77		Ir	—39 156 (21)
108	78		Pt	—37 830 (c)
107	79		Au	—31 690 (c)
106	80		Hg	—28 350 (c)
105	81		Tl	—19 860 (c)
104	82		Pb	—14 330 (c)
113	74	187	W	—39 893 (7)
112	75		Re	—41 205 (7)
111	76		Os	—41 208 (7)
110	77		Ir	—39 710 (c)
109	78		Pt	—36 810 (c)
108	79		Au	—32 870 (c)
107	80		Hg	—28 060 (c)
106	81		Tl	—21 930 (c)
105	82		Pb	—14 940 (c)
114	74	188	W	—38 657 (7)
113	75		Re	—39 006 (7)
112	76		Os	—41 125 (7)
111	77		Ir	—38 323 (13)
110	78		Pt	—37 788 (11)
109	79		Au	—32 490 (c)
108	80		Hg	—29 880 (c)
107	81		Tl	—22 290 (c)
106	82		Pb	—17 500 (c)
115	74	189	W	—35 470 (200)
114	75		Re	—37 970 (11)
113	76		Os	—38 978 (7)
112	77		Ir	—38 480 (c)
111	78		Pt	—36 570 (c)
110	79		Au	—33 410 (c)
109	80		Hg	—29 210 (c)
108	81		Tl	—24 020 (c)
107	82		Pb	—17 860 (c)
106	83		Bi	—9870 (c)
116	74	190	W	—34 220 (360)
115	75		Re	—35 520 (200)
114	76		Os	—38 699 (7)
113	77		Ir	—36 700 (200)
112	78		Pt	—37 318 (21)
111	79		Au	—32 876 (26)
110	80		Hg	—30 960 (80)
109	81		Tl	—24 160 (310)
108	82		Pb	—20 220 (c)
107	83		Bi	—10 850 (c)
116	75	191	Re	—34 343 (12)
115	76		Os	—36 388 (7)
114	77		Ir	—36 698 (7)
113	78		Pt	—35 698 (16)
112	79		Au	—33 870 (50)
111	80		Hg	—30 480 (70)
110	81		Tl	—25 670 (210)
109	82		Pb	—20 230 (c)
108	83		Bi	—13 050 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
116	76	192	Os	—35 875 (7)
115	77		Ir	—34 826 (7)
114	78		Pt	—36 283 (7)
113	79		Au	—32 768 (17)
112	80		Hg	—31 970 (с)
111	81		Tl	—25 590 (с)
110	82		Pb	—22 290 (с)
109	83		Bi	—13 670 (с)
117	76	193	Os	—33 387 (8)
116	77		Ir	—34 519 (6)
115	78		Pt	—34 458 (7)
114	79		Au	—33 360 (с)
113	80		Hg	—31 020 (с)
112	81		Tl	—27 020 (с)
111	82		Pb	—22 070 (с)
110	83		Bi	—15 560 (с)
109	84		Po	— 8 310 (с)
118	76	194	Os	—32 417 (7)
117	77		Ir	—32 514 (6)
116	78		Pt	—34 765 (6)
115	79		Au	—32 256 (16)
114	80		Hg	—32 206 (26)
113	81		Tl	—26 810 (с)
112	82		Pb	—23 810 (с)
111	83		Bi	—15 980 (с)
110	84		Po	—10 810 (с)
119	76	195	Os	—29 690 (500)
118	77		Ir	—31 692 (31)
117	78		Pt	—32 802 (6)
116	79		Au	—32 572 (6)
115	80		Hg	—31 050 (50)
114	81		Tl	—27 850 (210)
113	82		Pb	—23 550 (с)
112	83		Bi	—17 680 (210)
111	84		Po	—11 060 (с)
119	77	196	Ir	—29 440 (60)
118	78		Pt	—32 652 (6)
117	79		Au	—31 162 (9)
116	80		Hg	—31 846 (10)
115	81		Tl	—27 350 (с)
114	82		Pb	—25 150 (с)
113	83		Bi	—17 760 (с)
112	84		Po	—13 210 (с)
111	85		At	—4050 (с)
120	77	197	Ir	—28 430 (200)
119	78		Pt	—30 431 (6)
118	79		Au	—31 150 (6)
117	80		Hg	—30 735 (21)
116	81		Tl	—28 330 (с)
115	82		Pb	—24 630 (с)
114	83		Bi	—19 410 (с)
113	84		Po	—13 230 (с)
112	85		At	—6030 (с)
121	77	198	Ir	—25 520 (300)
120	78		Pt	—29 921 (20)
119	79		Au	—29 591 (6)
118	80		Hg	—30 964 (6)
117	81		Tl	—27 500 (80)
116	82		Pb	—25 900 (с)
115	83		Bi	—19 300 (с)
114	84		Po	—15 070 (с)
113	85		At	—6670 (310)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
121	78	199	Pt	—27 420 (25)
120	79		Au	—29 104 (6)
119	80		Hg	—29 557 (6)
118	81		Tl	—28 080 (220)
117	82		Pb	—25 280 (90)
116	83		Bi	—20 610 (с)
115	84		Po	—15 050 (с)
114	85		At	—8470 (210)
122	78	200	Pt	—26 600 (с)
121	79		Au	—27 300 (50)
120	80		Hg	—29 514 (6)
119	81		Tl	—27 060 (10)
118	82		Pb	—26 160 (с)
117	83		Bi	—20 460 (с)
116	84		Po	—16 740 (с)
115	85		At	—8670 (с)
114	86		Rn	—3740 (с)
123	78	201	Pt	—23 740 (110)
122	79		Au	—26 400 (100)
121	80		Hg	—27 672 (6)
120	81		Tl	—27 185 (16)
119	82		Pb	—25 327 (35)
118	83		Bi	—21 410 (с)
117	84		Po	—16 410 (с)
116	85		At	—10 520 (с)
115	86		Rn	—3950 (с)
123	79	202	Au	—23 860 (200)
122	80		Hg	—27 356 (6)
121	81		Tl	—25 988 (18)
120	82		Pb	—25 942 (11)
119	83		Bi	—21 040 (с)
118	84		Po	—17 780 (с)
117	85		At	—10 520 (с)
116	86		Rn	—5880 (с)
115	87		Fr	—3160 (310)
124	79	203	Au	—22 980 (с)
123	80		Hg	—25 277 (6)
122	81		Tl	—25 769 (6)
121	82		Pb	—24 794 (10)
120	83		Bi	—21 600 (50)
119	84		Po	—17 360 (90)
118	85		At	—11 970 (с)
117	86		Rn	—6000 (с)
116	87		Fr	1230 (210)
125	79	204	Au	—20 200 (300)
124	80		Hg	—24 703 (6)
123	81		Tl	—24 353 (6)
122	82		Pb	—25 117 (6)
121	83		Bi	—20 820 (с)
120	84		Po	—18 250 (с)
119	85		At	—11 970 (с)
118	86		Rn	—7770 (с)
117	87		Fr	870 (с)
116	88		Ra	6280 (с)
125	80	205	Hg	—22 299 (8)
124	81		Tl	—23 837 (5)
123	82		Pb	—23 777 (6)
122	83		Bi	—21 070 (9)
121	84		Po	—17 576 (35)
120	85		At	—12 960 (с)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
119	86		Rn	—7600 (с)
118	87		Fr	—1040 (с)
117	88		Ra	5980 (с)
126	80	206	Hg	—20 955 (21)
125	81		Tl	—22 269 (5)
124	82		Pb	—23 795 (5)
123	83		Bi	—20 033 (12)
122	84		Po	—18 190 (11)
121	85		At	—12 730 (с)
120	86		Rn	—8970 (с)
119	87		Fr	—1180 (с)
118	88		Ra	3960 (с)
126	81	207	Tl	—21 041 (6)
125	82		Pb	—22 463 (5)
124	83		Bi	—20 058 (8)
123	84		Po	—17 150 (11)
122	85		At	—13 310 (50)
121	86		Rn	—8690 (90)
120	87		Fr	—2650 (с)
119	88		Ra	3700 (с)
127	81	208	Tl	—16 768 (6)
126	82		Pb	—21 759 (5)
125	83		Bi	—18 879 (5)
124	84		Po	—17 475 (6)
123	85		At	—12 640 (с)
122	86		Rn	—9560 (с)
121	87		Fr	—2770 (с)
120	88		Ra	1930 (с)
128	81	209	Tl	—13 650 (15)
127	82		Pb	—17 624 (5)
126	83		Bi	—18 268 (5)
125	84		Po	—16 373 (7)
124	85		At	—12 888 (9)
123	86		Rn	—8994 (35)
122	87		Fr	—3760 (с)
121	88		Ra	1970 (с)
120	89		Ac	9120 (с)
129	81	210	Tl	—9251 (13)
128	82		Pb	—14 738 (5)
127	83		Bi	—14 801 (5)
126	84		Po	—15 963 (5)
125	85		At	—11 976 (12)
124	86		Rn	—9608 (12)
123	87		Fr	—3640 (с)
122	88		Ra	610 (с)
121	89		Ac	8860 (с)
129	82	211	Pb	—10 491,9 (38)
128	83		Bi	—11 865 (6)
127	84		Po	—12 444 (5)
126	85		At	—11 653 (9)
125	86		Rn	—8761 (11)
124	87		Fr	—4220 (50)
123	88		Ra	780 (90)
122	89		Ac	7400 (с)
130	82	212	Pb	—7562 (6)
129	83		Bi	—8135 (6)
128	84		Po	—10 381 (5)
127	85		At	—8625 (6)
126	86		Rn	—8666 (7)
125	87		Fr	—3690 (с)
124	88		Ra	— 110 (с)
123	89		Ac	7180 (с)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
131	82	213	Pb	—3140 (с)
130	83		Bi	—5243(11)
129	84		Po	—6663 (7)
128	85		At	—6589 (13)
127	86		Rn	—5706 (11)
126	87		Fr	—3556 (11)
125	88		Ra	290 (35)
124	89		Ac	6170 (с)
123	90		Th	12 240 (с)
132	82	214	Pb	—185,3 (33)
131	83		Bi	—1209 (12)
130	84		Po	—4479 (5)
129	85		At	—3389 (6)
128	86		Rn	—4328 (11)
127	87		Fr	— 965 (13)
126	88		Ra	90 (13)
125	89		Ac	6140 (с)
124	90		Th	10 870 (с)
132	83	215	Bi	1710 (100)
131	84		Po	—540,5 (37)
130	85		At	—1262 (7)
129	86		Rn	—1179 (10)
128	87		Fr	309 (13)
127	88		Ra	2531 (12)
126	89		Ac	5950 (50)
125	90		Th	10 870 (90)
133	83	216	Bi	5970 (с)
132	84		Po	1769 (6)
131	85		At	2237 (6)
130	86		Rn	245 (11)
129	87		Fr	2975 (14)
128	88		Ra	3285 (11)
127	89		Ac	7980 (с)
126	90		Th	10 390 (с)
133	84	217	Po	5960 (с)
132	85		At	4382 (12)
131	86		Rn	3649 (8)
130	87		Fr	4307 (15)
129	88		Ra	5881 (13)
128	89		Ac	8701 (15)
127	90		Th	12 141 (36)
134	84	218	Po	8354,6 (33)
133	85		At	8099 (13)
132	86		Rn	5212 (5)
131	87		Fr	7050 (6)
130	88		Ra	6644 (14)
129	89		Ac	10 837 (16)
128	90		Th	12 362 (16)
134	85	219	At	10 530 (80)
133	86		Rn	8830,7 (37)
132	87		Fr	8617 (9)
131	88		Ra	9377 (14)
130	89		Ac	11 560 (16)
129	90		Th	14 470 (24)
135	85	220	At	14 200 (с)
134	86		Rn	10 599 (6)
133	87		Fr	11 470 (8)
132	88		Ra	10 263 (15)
131	89		Ac	13 747 (17)
130	90		Th	14 663 (23)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
135	86	221	Rn	14 380 (c)
134	87		Fr	13 265 (12)
133	88		Ra	12 957 (9)
132	89		Ac	14 518 (18)
131	90		Th	16 934 (14)
136	86	222	Rn	16 370,0 (33)
135	87		Fr	16 338 (21)
134	88		Ra	14 312 (6)
133	89		Ac	16 617 (7)
132	90		Th	17 197 (16)
131	91		Pa	21 959 (35)
136	87	223	Fr	18 382,3 (37)
135	88		Ra	17 234,8 (37)
134	89		Ac	17 825 (9)
133	90		Th	19 256 (17)
132	91		Pa	22 330 (19)
137	87	224	Fr	21 710 (c)
136	88		Ra	18 813 (6)
135	89		Ac	20 219 (8)
134	90		Th	19 993 (18)
133	91		Pa	23 798 (20)
138	87	225	Fr	23 790 (c)
137	88		Ra	21 987,3 (36)
136	89		Ac	21 626 (12)
135	90		Th	22 303 (11)
134	91		Ra	24 320 (21)
139	87	226	Fr	27 460 (330)
138	88		Ra	28 665,7 (33)
137	89		Ac	24 301,0 (38)
136	90		Th	23 189 (6)
135	91		Pa	26 029 (12)
134	92		U	27 186 (34)
140	87	227	Fr	29 580 (100)
139	88		Ra	27 185 (20)
138	89		Ac	25 850,0 (31)
137	90		Th	25 806,3 (37)
136	91		Pa	26 832 (10)
135	92		U	28 880 (c)
140	88	228	Ra	28 941 (5)
139	89		Ac	28 895 (5)
138	90		Th	26 758 (6)
137	91		Pa	28 870 (9)
136	92		U	29 221 (21)
141	88	229	Ra	32 720 (c)
140	89		Ac	30 720 (150)
139	90		Th	29 580,9 (34)
138	91		Pa	29 887 (13)
137	92		U	31 201 (11)
136	93		Np	33 758 (29)
142	88	230	Ra	34 560 (c)
141	89		Ac	33 760 (c)
140	90		Th	30 861,3 (29)
139	91		Pa	32 165,5 (37)
138	92		U	31 607 (6)
137	93		Np	35 232 (24)
142	89	231	Ac	35 910 (100)
141	90		Th	33 812,2 (30)
140	91		Pa	33 423,1 (31)
139	92		U	33 780 (50)
138	93		Np	35 626 (13)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
143	89	232	Ac	39 150 (c)
142	90		Th	35 447,2 (23)
141	91		Pa	35 934 (12)
140	92		U	34 597 (6)
139	93		Np	37 290 (c)
138	94		Pu	38 362 (23)
143	90	233	Th	38 732,3 (24)
142	91		Pa	37 487,1 (24)
141	92		U	36 914,7 (33)
140	93		Np	38 010 (c)
139	94		Pu	40 042 (23)
144	90	234	Th	40 612 (4)
143	91		Pa	40 349 (5)
142	92		U	38 142,6 (24)
141	93		Np	39 951 (9)
140	94		Pu	40 342 (8)
139	95		Am	44 460 (c)
145	90	235	Th	44 150 (c)
144	91		Pa	42 320 (100)
143	92		U	40 916,4 (24)
142	93		Np	41 039,5 (26)
141	94		Pu	42 160 (6)
140	95		Am	44 650 (c)
145	91	236	Pa	45 540 (200)
144	92		U	42 442,0 (23)
143	93		Np	43 426 (10)
142	94		Pu	42 889 (6)
141	95		Au	46 020 (c)
140	96		Cm	47 890 (c)
146	91	237	Pa	47 640 (50)
145	92		U	45 388,7 (25)
144	93		Np	44 869,3 (23)
143	94		Pu	45 087 (6)
142	95		Am	46 640 (c)
141	96		Cm	49 170 (c)
147	91	238	Pa	51 270 (300)
146	92		U	48 307,0 (22)
145	93		Np	47 452,6 (23)
144	94		Pu	46 160,8 (24)
143	95		Am	48 417 (32)
142	96		Cm	49 398 (31)
141	97		Bk	54 280 (c)
147	92	239	U	50 572,2 (22)
146	93		Np	49 306,4 (30)
145	94		Pu	48 585,1 (24)
144	95		Am	49 389 (5)
143	96		Cm	51 090 (c)
142	97		Bk	54 280 (c)
148	92	240	U	52 712 (5)
147	93		Np	52 210 (60)
146	94		Pu	50 122,8 (23)
145	95		Am	51 443 (20)
144	96		Cm	51 712 (6)
143	97		Bk	55 710 (c)
142	98		Cf	58 030 (c)
148	93	241	Np	54 310 (100)
147	94		Pu	52 953,0 (23)
146	95		Am	52 932,2 (23)
145	96		Cm	53 606 (6)
144	97		Bk	56 100 (c)
143	98		Cf	59 190 (c)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
149	93	242	Np	57 250 (с)
148	94		Pu	54 715,0 (23)
147	95		Am	55 462,7 (27)
146	96		Cm	54 801,5 (24)
145	97		Bk	57 800 (с)
144	98		Cf	59 332 (33)
149	94	243	Pu	57 752,5 (35)
148	95		Am	57 170,1 (32)
147	96		Cm	57 177,4 (26)
146	97		Bk	58 685 (6)
145	98		Cf	60 910 (с)
144	99		Es	64 800 (с)
150	94	244	Pu	59 803 (5)
149	95		Am	59 878,6 (31)
148	96		Cm	58 449,6 (23)
147	97		Bk	60 646 (21)
146	98		Cf	61 465 (6)
145	99		Es	65 970 (с)
151	94	245	Pu	63 157 (30)
150	95		Am	61 897,3 (36)
149	96		Cm	61 001,3 (29)
148	97		Bk	61 811 (5)
147	98		Cf	63 377 (6)
146	99		Es	66 380 (с)
145	100		Fm	70 020 (с)
152	94	246	Pu	65 290 (50)
151	95		Am	64 920 (50)
150	96		Cm	62 616,0 (34)
149	97		Bk	64 020 (с)
148	98		Cf	64 096,2 (31)
147	99		Es	67 930 (с)
146	100		Fm	70 131 (36)
152	95	247	Am	67 130 (с)
151	96		Cm	65 530 (5)
150	97		Bk	65 484 (6)
149	98		Cf	66 150 (с)
148	99		Es	68 550 (31)
147	100		Fm	71 540 (с)
153	95	248	Am	70 490 (с)
152	96		Cm	67 389 (6)
151	97		Bk	67 990 (с)
150	98		Cf	67 243 (31)
149	99		Es	70 220 (с)
148	100		Fm	71 891 (21)
147	101		Md	77 000 (с)
153	96	249	Cm	70 748 (8)
152	97		Bk	69 848,0 (35)
151	98		Cf	69 721,6 (30)
150	99		Es	71 116 (7)
149	100		Fm	73 500 (с)
148	101		Md	77 260 (с)
154	96	250	Cm	72 986 (12)
153	97		Bk	72 950 (5)
152	98		Cf	71 169,8 (35)
151	99		Es	73 170 (с)
150	100		Fm	74 069 (31)
149	101		Md	78 600 (с)
154	97	251	Bk	75 250 (с)
153	98		Cf	74 130 (5)
152	99		Es	74 503 (8)

Продолжение табл. 39.1

N	Z	A	Элемент	Дефект массы, кэВ
151	100		Fm	76 000 (с)
150	101		Md	79 030 (с)
155	97	252	Bk	78 530 (с)
154	98		Cf	76 031 (6)
153	99		Es	77 150 (с)
152	100		Fm	76 822 (33)
151	101		Md	80 500 (с)
150	102		No	82 862 (26)
155	98	253	Cf	79 299 (10)
154	99		Es	79 012,4 (35)
153	100		Fm	79 346 (5)
152	101		Md	81 240 (с)
151	102		No	84 330 (с)
156	98	254	Cf	81 342 (12)
155	99		Es	81 992 (6)
154	100		Fm	80 899 (5)
153	101		Md	83 390 (с)
152	102		No	84 729 (34)
156	99	255	Es	84 080 (с)
155	100		Fm	83 796 (5)
154	101		Md	84 880 (с)
153	102		No	86 870 (с)
152	103		Lr	90 250 (с)
157	99	256	Es	87 260 (с)
156	100		Fm	85 481 (8)
155	101		Md	87 420 (с)
154	102		No	87 801 (40)
153	103		Lr	91 820 (с)
157	100	257	Fm	88 588 (10)
156	101		Md	89 040 (с)
155	102		No	90 223 (31)
154	103		Lr	92 970 (с)
153	104		—	95 950 (с)
157	101	258	Md	91 820 (с)
156	102		No	91 520 (с)
155	103		Lr	94 820 (с)
154	104		—	96 550 (с)
157	102	259	No	94 026 (11)
156	103		Lr	96 000 (с)
155	104		—	98 500 (с)
157	103	260	Lr	98 140 (с)
156	104		—	99 230 (с)
155	105		—	103 650 (с)
157	104	261	—	101 250 (с)
156	105		—	104 460 (с)
157	105	262	—	106 040 (с)
157	106	263	—	110 310 (с)

39.4. ПОРОГ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ

Если энергия реакции $Q<0$, то реакция идет с поглощением энергии, и для того чтобы она началась, падающая частица должна обладать энергией, превышающей порог реакции:

$$E_{\text{пор}} = |Q|\,(M_1 + M_2)/M_2,$$

где M_1 и M_2 — массы частиц во входном канале реакции.

39.5. КУЛОНОВСКИЙ БАРЬЕР

Заряженные частицы, вступая в реакцию, должны преодолеть электростатическое отталкивание их зарядов — так называемый кулоновский барьер.

Высота кулоновского барьера ядра с зарядом Z_1e и радиусом R_1 для частицы с зарядом Z_2e и радиусом R_2 дается выражением

$$E_{\text{Кул}} = Z_1 Z_2 e^2/(R_1 + R_2),$$

где $R_1+R_2=R_0(A_1^{1/3}+A_2^{1/3})$; R_0 — постоянная, принимаемая обычно равной около 1 фм (1 фм$=10^{-15}$ м); A_1 и A_2 — массовые числа взаимодействующих ядер.

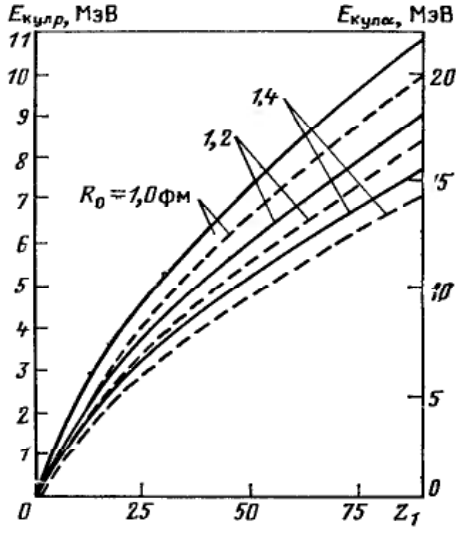


Рис. 39.1. Высота кулоновского барьера для протонов (сплошные кривые) и α-частиц (пунктир)

На рис. 39.1 приведен график зависимости высоты кулоновского барьера от Z_1, вычисленной на основе приведенных выше формул для наиболее распространенного изотопа данного элемента [2].

39.6. КИНЕМАТИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Под кинематикой ядерной реакции понимают соотношения между энергиями частиц, участвующих в реакции, а также соотношения между углами и сечениями в ЛСК и СЦМ (рис. 39.2).

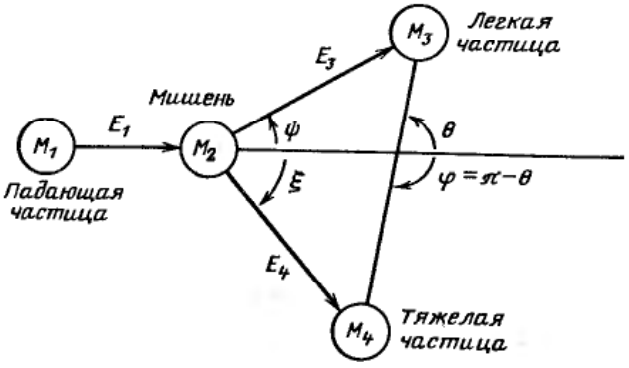


Рис. 39.2. Кинематическая схема ядерной реакции: M_i и E_i — массы и энергии участвующих частиц; ψ и ξ — углы разлета частиц в ЛСК; θ и φ — в СЦМ

Ниже приведены наиболее важные кинематические уравнения для нерелятивистских и релятивистских энергий. Для частиц с нерелятивистской энергией справедливы уравнения

$$\sqrt{E_3} = \frac{\sqrt{M_1 M_3 E_1}}{M_3 + M_4}\cos\psi\left(1 \pm \left\{1 + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{1 + M_4/M_3}{\cos^2\psi}\left[\frac{M_4}{M_1}\left(1 + \frac{Q}{E_1}\right) - 1\right]\right\}^{1/2}\right);$$

$$Q = \frac{M_3 + M_4}{M_4} E_3 - \frac{M_4 - M_1}{M_4} E_1 -$$

$$- \frac{\sqrt{M_1 M_3 E_1 E_3}}{M_4}\cos\psi.$$

Введем следующие обозначения: ψ и ξ — углы вылета частиц в ЛСК; θ и φ — углы вылета в СЦМ; E_i — энергии частиц в ЛСК; E_i' — энергия в СЦМ:

$Q = (M_1 + M_2 - M_3 - M_4)\,c^2$ энергия реакции;

$$E_T = E_1 + Q = E_3 + E_4;$$

$$A = \frac{M_1 M_4}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)}\frac{E_1}{E_T};$$

$$B = \frac{M_1 M_3}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)}\frac{E_1}{E_T};$$

$$C = \frac{M_2 M_3}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)}\left(1 + \frac{M_1}{M_2}\frac{Q}{E_T}\right) = \frac{E_4'}{E_T};$$

$$D = \frac{M_2 M_4}{(M_1 + M_2)(M_3 + M_4)}\left(1 + \frac{M_1}{M_2}\frac{Q}{E_T}\right) = \frac{E_3'}{E};$$

$$A + B + C + D = 1;\ AC = BD.$$

Приведем расчетные формулы для кинематики ядерных реакций в нерелятивистском случае:

Энергия легкой частицы в ЛСК

$$E_3/E_T = B + D + 2(AC)^{1/2} \times$$
$$\times \cos\theta = B[\cos\psi \pm$$
$$\pm (D/B - \sin^2\psi)^{1/2}]^2$$

(если $B \ll D$, используется только знак плюс; если $B > D$, используются оба знака — в этом случае существует предельный угол вылета)

Энергия тяжелой частицы в ЛСК

$$E_4/E_T = A + C +$$
$$+ 2(AC)^{1/2}\cos\varphi = A[\cos\xi \pm$$
$$\pm (C/A - \sin^2\xi)^{1/2}]^2$$

(если $A \ll C$, используется только знак плюс; если $A > C$, используются оба знака — в этом случае существует предельный угол вылета)

Угол вылета тяжелой частицы в ЛСК

$$\sin\xi = \left(\frac{M_3 E_3}{M_4 E_4}\right)^{1/2}\sin\psi$$

Угол вылета легкой частицы СЦМ

$$\sin\theta = \left(\frac{E_3}{E_T D}\right)^{1/2}\sin\psi$$

Соотношения сечений и углов вылета в ЛСК и СЦМ для легкой частицы

$$\frac{\sigma(\theta)}{\sigma\psi)} = \frac{\sin\psi d\psi}{\sin\theta d\theta} = \frac{\sin^2\psi}{\sin^2\theta}\cos(\theta-\psi) = \frac{(AC)^{1/2}(D/B-\sin^2\psi)^{1/2}}{E_3/E_T}$$

Соотношения сечений и углов вылета в ЛСК и СЦМ для тяжелой частицы

$$\frac{\sigma(\varphi)}{\sigma(\xi)} = \frac{\sin\xi d\xi}{\sin\varphi d\varphi} = \frac{\sin^2\xi}{\sin^2\varphi}\cos(\varphi-\xi) = \frac{(AC)^{1/2}(C/A-\sin^2\xi)^{1/2}}{E_4/E_T}$$

Соотношения сечений и углов вылета для частиц — продуктов реакции в ЛСК

$$\frac{\sigma(\xi)}{\sigma(\psi)} = \frac{\sin\psi d\psi}{\sin\xi d\xi} = \frac{\sin^2\psi\cos(\theta-\psi)}{\sin^2\xi\cos(\varphi-\xi)}.$$

Для частиц с релятивистской энергией к введенным выше обозначениям добавляются: M — масса покоя, МэВ (т. е. скорость света $c=1$); T — кинетическая энергия; $E=T+M$ — полная энергия; $P=\sqrt{E^2-M^2}=\sqrt{T^2+2MT}$ — релятивистский импульс;

$$E_T = T_1 + M_1 + M_2;$$

$$A = 2M_2T_1 + 2M_1M_3 + 2M_2M_3 + 2Q(M_1+M_2-M_3) - Q^2;$$

$$B = E_T^2 - P_1^2\cos^2\psi;\ \partial B/\partial\psi = 2P_1^2\sin\psi\cos\psi;$$

$$T_3 = E_3 - M_3 = (1/2B)\left[E_T A \pm P_1\cos\psi\sqrt{A^2-2M_3^2B}\right] - M_3;$$

$$T_4 = E_4 - M_4 = E_T - E_3 - (M_1+M_2-M_3-Q);$$

$$Q = M_1+M_2-M_3-\left[M_1^2+M_2^2+M_3^2+2M_2E_1 - 2E_3(E_1+M_2)+2P_1P_3\cos\psi\right]^{1/2};$$

$$\xi = \sin^{-1}[(P_3/P_4)\sin\psi];$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial\psi} = -\frac{E_3}{B}\frac{\partial B}{\partial\psi} \pm \frac{P_1}{2B}\frac{A^2+4M_3^2\left(E_T^2-2B\right)}{\sqrt{A^2-4M_3^2B}}\sin\psi;$$

$$E_{\text{пор}} = |Q|\left[(M_1+M_2)/M_2 + |Q|/2M_2\right].$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wapstra A. N., Bos K.**//Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1977. Vol. 19. P. 177—216.

2. **Marion J. B., Young F. C.** Nuclear Reaction Analysis: Graphs and Tables. Amsterdam: North-Holland Publ. Comp. 1968.

Глава 40
ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

А. И. Обухов, И. С. Григорьев

40.1. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Деление атомного ядра — это процесс распада на два (реже три и четыре) сравнимых по массе ядра — осколка деления. Впервые деление ядер наблюдалось при облучении ядер урана нейтронами [1], затем было обнаружено спонтанное деление ядер урана [2]. Для ядер с массовым числом $A>100$ реакция деления экзотермична, поскольку энергия связи, приходящаяся на один нуклон, в ядрах-осколках больше, чем в делящемся ядре. Освобождаемая при делении ядер энергия выделяется в виде кинетической энергии осколков, энергии, которая уносится нейтронами, γ-квантами, β-частицами и антинейтрино, сопровождающими процесс деления ядер.

Энергию возбуждения можно сообщить ядру облучением его γ-квантами или бомбардировкой его нейтронами и заряженными частицами высоких энергий, которые при неупругих соударениях передают ядру часть своей энергии. Особо важное значение имеет процесс деления ядер при захвате нейтронов.

Порог деления, вызванного γ-квантами, т. е. энергия наиболее низкоэнергетических γ-квантов, еще способных вызвать деление, является непосредственной мерой минимальной энергии возбуждения ядра, необходимой для деления. Порог реакции деления под действием нейтронов меньше порога фотоделения составного ядра на энергию связи нейтрона с ядром мишени, вследствие чего некоторые из порогов реакции деления ядер под действием нейтронов отрицательны. Это означает, что процесс деления возможен при захвате ядрами тепловых и холодных нейтронов. Такие ядра называются хорошо делящимися (^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu).

Кроме деления ядер под действием указанных механизмов возбуждения возможен процесс деления ядер без каких-либо видимых внешних воздействий на ядро. Такой процесс называют спонтанным делением ядер. Принято считать, что в невозбужденных ядрах (представляемых как маленькие капли) имеют место колебания с периодом 10^{-20}—10^{-21} с и амплитудой 0,1—0,2 радиуса ядра. Наличие барьера деления сдерживает самопроизвольный развал ядра, однако после огромного числа колебаний барьер может оказаться случайно пройденным посредством туннельного перехода. Времена жизни ядер по отношению к спонтанному делению изменяются от 10^{21} лет для изотопов урана и тория до миллисекунд для ядер с зарядом $Z=104\div107$.

Образующиеся при делении тяжелого ядра осколки в большинстве случаев имеют разные массы: например, при делении ядер урана масса легкого осколка составляет 90—100 а.е.м., а масса тяжелого — 130—140 а.е.м.

Скорости осколков — порядка 10^9 см/с. Импульсы равны и противоположны по знаку. Скорость осколков достигает 0,9 конечного значения за время около 10^{-20} с при расстоянии между ними порядка 10^{-11} см, когда они еще находятся внутри наинизшей электронной оболочки атома.

Осколки деления первоначально находятся в возбужденных состояниях. Их суммарная энергия возбуждения примерно равна 20 МэВ. В первую очередь осколки за 10^{-14}—10^{-17} с сбрасывают лишние нейтроны (мгновенные нейтроны деления). Средняя энергия возбуждения осколка после испускания нейтронов равна половине энергии связи нейтрона и составляет для обоих осколков 6—7 МэВ. Эта энергия излучается в виде γ-квантов за 10^{-9}—10^{-14} с.

В начале своего пути осколки имеют положительный заряд от 10 до 20 электронных зарядов, так как некоторые из орбитальных электронов «стряхиваются» при делении. Проходя через вещество, осколки теряют свою энергию в основном на ионизацию среды. Вдоль пути двух осколков образуется примерно $5 \cdot 10^6$ пар ионов. Время замедления осколков в воздухе порядка 10^{-9} с, а в плотных средах — 10^{-12} с. За это время они пробегают в воздухе расстояние около 2 см, а в плотных средах — 10^{-3} см.

Заряд замедлившихся осколков сильно отличается от заряда стабильных нуклидов той же массы. Это различие уменьшается в серии β-распадов (обычно трех или четырех для каждого осколка).

В отдельных случаях β-распад продуктов деления приводит к высоковозбужденным состояниям дочернего ядра, для которых возможен выброс нейтрона. Так как константа распада по отношению к эмиссии этого «запаздывающего» нейтрона намного превышает константу β-распада, испускание нейтронов следует за β-распадом материнского ядра почти мгновенно и временная зависимость интенсивности запаздывающих нейтронов такая же, как у β-распада материнского ядра.

Более подробные сведения о делении ядер можно найти в [3—9].

40.2. БАРЬЕРЫ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Вероятность деления ядра (в капельной модели) при малых энергиях возбуждения $E \leqslant 6$ МэВ связывалась с проницаемостью потенциального барьера, зависимость которого от деформации ядра δ вблизи вершины предполагалась примерно параболической:

$$U(\delta) = B_{\max} - \text{const}\,(\delta - \delta_0)^2,$$

где δ_0 — деформация, отвечающая максимальной высоте барьера $B_{\max}$.

Таблица 40.1. Барьеры деления B_A и B_B и глубина второй ямы E_{II}, МэВ [10]. Здесь и далее в круглых скобках указаны погрешности

Делящееся ядро	B_A	E_{II}	B_B
^{228}Ra	8,0 (0,5)	—	8,5 (0,5)
^{226}Ac	6,0 (0,6)	—	7,7 (0,3)
^{227}Th	5,9 (0,3)	—	6,6 (0,3)
^{228}Th	6,2 (0,3)	—	6,5 (0,3)
^{229}Th	—	—	6,5 (0,3)
^{230}Th	6,1 (0,2)	—	6,5 (0,3)
^{231}Th	6,0 (0,1)	$<5,8$	6,1 (0,3)
^{232}Th	5,8 (0,2)	$\ll 4,5$	6,2 (0,2)
^{233}Th	6,3 (0,2)	$<6,2$	6,3 (0,2)
^{234}Th	6,1 (0,2)	—	6,5 (0,2)
^{231}Pa	5,9 (0,2)	—	5,9 (0,3)
^{232}Pa	6,1 (0,3)	$<5,7$	6,2 (0,2)
^{233}Pa	6,1 (0,3)	—	6,1 (0,3)
^{232}U	5,2 (0,2)	—	5,1 (0,3)
^{234}U	5,6 (0,2)	—	5,5 (0,2)
^{235}U	5,9 (0,2)	$2,5 \pm 0,3$	5,6 (0,2)
^{236}U	5,6 (0,2)	$2,3 \pm 0,2$	5,5 (0,2)
^{237}U	6,1 (0,2)	$2,5 \pm 0,4$	5,9 (0,2)
^{238}U	5,7 (0,2)	$2,6 \pm 0,1$	5,7 (0,2)
^{239}U	6,3 (0,2)	$1,9 \pm 0,3$	6,1 (0,2)
^{240}U	5,7 (0,2)	—	5,5 (0,2)
^{234}Np	5,5 (0,2)	—	5,1 (0,2)
^{235}Np	5,5 (0,2)	—	5,2 (0,2)
^{236}Np	5,8 (0,2)	—	5,6 (0,2)
^{237}Np	5,7 (0,2)	$2,8 \pm 0,3$	5,4 (0,2)
^{238}Np	6,1 (0,2)	$2,3 \pm 0,3$	6,0 (0,2)
^{239}Np	5,9 (0,2)	—	5,4 (0,2)
^{232}Pu	5,3 (0,4)	—	—
^{234}Pu	5,8 (0,7)	—	—
^{235}Pu	—	$2,6 \pm 0,4$	5,1 (0,4)
^{236}Pu	—	—	4,5 (0,4)
^{237}Pu	—	$2,8 \pm 0,2$	—
^{238}Pu	5,5 (0,2)	$2,7 \pm 0,2$	5,0 (0,2)
^{239}Pu	6,2 (0,2)	$2,6 \pm 0,2$	5,5 (0,2)
^{240}Pu	5,6 (0,2)	$2,4 \pm 0,3$	5,1 (0,2)
^{241}Pu	6,1 (0,2)	$1,9 \pm 0,3$	5,4 (0,2)
^{242}Pu	5,5 (0,2)	—	5,1 (0,2)
^{243}Pu	5,9 (0,2)	$1,7 \pm 0,3$	5,2 (0,2)
^{244}Pu	5,4 (0,2)	—	5,0 (0,2)
^{245}Pu	5,6 (0,2)	—	5,0 (0,2)
^{237}Am	—	$2,4 \pm 0,2$	—
^{238}Am	—	$2,6 \pm 0,2$	—
^{239}Am	6,2 (0,3)	$2,4 \pm 0,2$	—
^{240}Am	6,5 (0,2)	$3,0 \pm 0,2$	5,2 (0,3)
^{241}Am	6,0 (0,2)	$2,2 \pm 0,2$	5,1 (0,3)
^{242}Am	6,5 (0,2)	$2,9 \pm 0,2$	5,4 (0,3)
^{243}Am	5,9 (0,2)	$2,3 \pm 0,2$	5,4 (0,3)
^{244}Am	6,3 (0,2)	$2,8 \pm 0,4$	5,4 (0,3)
^{245}Am	5,9 (0,2)	—	5,2 (0,3)
^{247}Am	5,5 (0,2)	—	—
^{241}Cm	6,3 (0,3)	$2,1 \pm 0,3$	4,3 (0,5)
^{242}Cm	5,8 (0,4)	—	4,0 (0,5)
^{243}Cm	6,4 (0,3)	$1,9 \pm 0,3$	—
^{244}Cm	5,8 (0,2)	—	4,3 (0,3)
^{245}Cm	6,2 (0,2)	$2,1 \pm 0,3$	—
^{246}Cm	5,7 (0,2)	—	4,2 (0,3)
^{247}Cm	6,0 (0,2)	—	—
^{248}Cm	5,7 (0,2)	—	—
^{249}Cm	5,6 (0,2)	—	—
^{250}Cm	5,3 (0,2)	—	—
^{249}Bk	6,1 (0,2)	—	—
^{250}Bk	6,1 (0,2)	—	4,1 (0,3)

Продолжение табл. 40.1

Делящееся ядро	B_A	E_{II}	B_B
^{250}Cf	5,6 (0,3)	—	—
^{253}Cf	5,4 (0,3)	—	—
^{250}Es	6,7	—	—
^{255}Fm	5,7	—	—

Таблица 40.2. **Высота барьеров деления B_{max} ядер от ^{213}At до ^{153}Tb [11]**

Составное ядро	B_{max}, МэВ	Составное ядро	B_{max}, МэВ
^{213}At	17,3	^{197}Au	23,4—25,1
^{212}At	18,6	^{196}Au	22,5—23,9
^{212}Po	19,6	^{195}Au	20,8—22,9
^{211}Po	20,5—20,6	^{194}Au	20,1—21,7
^{210}Po	21,2	^{196}Pt	24,9—26,3
^{209}Po	21,1	^{194}Pt	22,8—24,4
^{208}Po	19,9	^{193}Pt	22,7—24,2
^{207}Po	19,3	^{192}Pt	21,4—23,1
^{210}Bi	24,2—24,4	^{191}Pt	20,8—22,5
^{208}Bi	23,6—24,1	^{191}Ir	23,2
^{207}Bi	22,8—22,9	^{190}Ir	22,6—22,9
^{206}Bi	22,4	^{189}Ir	22,0—22,1
^{208}Pb	27,4	^{188}Ir	22,2
^{207}Pb	26,9—27,0	^{190}Os	25,6
^{206}Pb	25,3	^{188}Os	24,4
^{205}Pb	24,6	^{187}Os	24,6—24,8
^{204}Pb	23,2—23,8	^{186}Os	24,1
^{201}Tl	23,1	^{185}Os	24,0
^{200}Tl	22,8	^{185}Re	26,2
^{200}Hg	23,5—24,6	^{184}Re	26,3
^{199}Hg	23,1—24,7	^{181}Re	19,0 [12]
		^{184}W	28,3
^{198}Hg	21,4—22,7	^{183}W	28,3
^{197}Hg	21,1—22,7	^{182}W	27,4
^{196}Hg	19,7—21,2	^{181}W	26,9—27,0
		^{180}W	26,5—26,6
^{198}Au	23,7—24,9	^{179}W	25,8
		^{179}Ta	28,6
		^{173}Lu	30,5
		^{173}Yb	33,4
		^{170}Yb	30,6
		^{153}Tb	28,9 [12]

Обнаружение в недавнем времени ряда новых явлений (спонтанно делящихся изомеров, широких подбарьерных резонансов, групп узких резонансов с большой парциальной делимостью и других) привело к представлению о более сложной, двугорбой структуре барьера с максимумами высотой B_A и B_B при деформациях соответственно $\delta_A \approx 0{,}4$ и $\delta_B \approx 0{,}8$. Седловина между максимумами располагается при значении $\delta_{II} \approx 0{,}6$, а дно этого минимума расположено на E_{II} выше основного состояния [10].

В табл. 40.1 приведены параметры двугорбой структуры барьеров тяжелых ядер ($z \geqslant 88$), а в табл. 40.2 — значения B_{max} для ядер с $Z \leqslant 85$, с одногорбым барьером деления. Внутренний барьер B_A ядер от Th до Fm равен 5—6 МэВ.

Барьеры деления ядер с $Z < 85$ увеличиваются с уменьшением Z^2/A. Для еще более легких ядер модель жидкой капли предсказывает увеличение барьера деления, прохождение его через максимум в области ядер молибдена и затем уменьшение до нуля при $Z^2/A \longrightarrow 0$.

40.3. СПОНТАННОЕ ДЕЛЕНИЕ

В табл. 40.3 и 40.4 приведены периоды спонтанного деления ядер из основного и изомерных состояний.

В табл. 40.3 приведены значения периодов спонтанного деления ядер из основного состояния изотопов трех природных и пятнадцати синтезированных элементов. Период полураспада уменьшается на ~ 31 порядок от Th до Ku, а далее слабо изменяется. Там же приведены значения чисел мгновенных нейтронов и кинетической энергии парных осколков при спонтанном делении ядер. Кроме того, в таблицу включены сведения о новом типе радиоактивности — спонтанном расщеплении с испусканием фрагментов типа ^{14}C в случае ядер франция и радия и ^{24}Ne в случае урана. В этих случаях (отмеченных звездочкой) вместо $T_{1/2}$ приведена доля распадов на тяжелые фрагменты по отношению к испусканию α-частиц. В столбце $E_к$ для этих случаев приведены значения кинетической энергии этих фрагментов.

В табл. 40.4 приведены значения периодов спонтанного деления из изомерного состояния во второй яме для ядер от U до Bk. В сравнении со спонтанным делением из основного состояния в первой яме спонтанное деление из изомерного состояния имеет гораздо меньшие времена жизни, что связано со значительно меньшими значениями величин и ширин внешнего барьера B_B.

Таблица 40.3. **Периоды полураспада ядер $T_{1/2}$ из основного состояния путем спонтанного деления, средние числа мгновенных нейтронов $\bar{\nu}_{мгн}$ и средние кинетические энергии $E_к$ осколков деления**

Элемент	A	$T_{1/2}$ [13—17]	$\bar{\nu}_{мгн}$ [18]	$E_к$, МэВ [19]
$_{87}$Fr	221	$< 4{,}4 \cdot 10^{-12}$*	—	31,3 [35]
$_{88}$Ra	221	$< 4{,}4 \cdot 10^{-12}$*	—	32,4 [35]
	222	$3{,}7\,(6) \cdot 10^{-10}$*	—	33,0 [35]
	223	$6{,}1\,(10) \cdot 10^{-10}$*	—	31,9 [35]
	224	$4{,}3\,(12) \cdot 10^{-11}$*	—	30,5 [35]
$_{90}$Th	230	$1{,}5\,(15) \cdot 10^{17}$ лет	1,24 (15)*1 [20]	—
	232	$> 1{,}0 \cdot 10^{21}$ лет	2,13 (20) [21]	—
$_{91}$Pa	230	$> 10^{16}$ лет [20]	—	—
	231	$1{,}1 \cdot 10^{16}$ лет	—	—
$_{92}$U	232	$7{,}8\,(60) \cdot 10^{13}$ лет	—	—
	232	$2{,}0\,(5) \cdot 10^{-12}$*	—	32,8 [36]
	233	$1{,}2\,(3) \cdot 10^{17}$ лет	—	—
	234	$1{,}42\,(8) \cdot 10^{16}$ лет	1,63 (15)*1 [20]	—
	235	$9{,}8\,(28) \cdot 10^{18}$ лет	—	—
	236	$2{,}43\,(13) \cdot 10^{16}$ лет	1,89 (5)	—
	238	$8.08\,(26) \cdot 10^{15}$ лет	1,98 (3)	168,2 (11)
	228	10^{8} лет [22]	—	—
$_{93}$Np	237	10^{18} лет	—	—
	239	$> 5 \cdot 10^{12}$ лет [20]	—	—
$_{94}$Pu	236	$3{,}5\,(10) \cdot 10^{9}$ лет	2,21 (18)	—
	238	$4{,}77\,(13) \cdot 10^{10}$ лет	2,24 (8)	—
	239	$7{,}8(16) \cdot 10^{15}$ лет	—	—
	240	$1{,}15\,(4) \cdot 10^{11}$ лет	2,17 (1)	180,4 (3)
	241	$> 3 \cdot 10^{15}$ лет	—	—
	242	$6{,}84\,(8) \cdot 10^{10}$ лет	2,153 (19)	179,96 (20)
	244	$6{,}56\,(32) \cdot 10^{10}$ лет	2,30 (19)	181,8 (10)
$_{95}$Am	232	10^{2} лет [22]	—	—
	234	10^{4} лет [22]	—	—
	240	10^{14} лет [22]	—	—
	241	$1{,}06\,(3) \cdot 10^{14}$ лет	—	—
	242	$8{,}8\,(33) \cdot 10^{11}$ лет	2,42 (14)*1 [20]	—
	243	$3{,}35\,(31) \cdot 10^{13}$ лет	—	—
	244	10^{14} лет [22]	—	—
$_{96}$Cm	240	$1{,}9 \cdot 10^{6}$ лет	—	—
	242	$6{,}5\,(6) \cdot 10^{6}$ лет	2,538 (12)	—
	244	$1{,}344\,(2) \cdot 10^{7}$ лет	2,696 (10)	181,5 (10)
	246	$1{,}81\,(4) \cdot 10^{7}$ лет	2,950 (14)	184,2 (5)
	248	$4{,}11\,(4) \cdot 10^{6}$ лет	3,157 (15)	182,5 (9)
	250	$1{,}13\,(5) \cdot 10^{4}$ лет	3,17 (8)	179,1 (27)
$_{97}$Bk	246	$2 \cdot 10^{13}$ лет [22]	—	—
	249	$1{,}864\,(87) \cdot 10^{9}$ лет	3,395 (26)	—
$_{98}$Cf	246	$1{,}83 \cdot 10^{3}$ лет	3,14 (9)	196,6 (20)
	248	$7 \cdot 10^{2}$ лет	—	189,3 (30)
	249	$6{,}98\,(15) \cdot 10^{10}$ лет	—	—
	250	$1{,}70\,(7) \cdot 10^{4}$ лет	3,51 (4)	187,0 (5)
	252	85,38 (39) года	3,7675 (40)	186,3 (10)
	254	0,1656 (5) года	3,83 (5)	188,3 (20)
$_{99}$Es	253	$6{,}42\,(22) \cdot 10^{5}$ лет	—	191,3 (30)
	254	$> 2{,}5 \cdot 10^{7}$ лет	—	—
	255	$2{,}44\,(14) \cdot 10^{3}$ лет	—	—
$_{100}$Fm	242	$0{,}82 \cdot 10^{-3}$с	—	—
	244	$3.3 \cdot 10^{-3}$с	—	—
	246	15 с	—	199,6 (40)
	248	$3{,}6 \cdot 10^{4}$ с	—	198,7 (40)
	250	10 лет	—	—
	252	115 лет	—	—
	254	228(1) сут	3,98 (19)	194,9 (10)
	255	$\sim 10^{4}$ лет	—	—
	256	2,6 ч	3,74 (18)	198,2 (5)
	257	131 (3) год	3,796 (14)	197,6
	258	0,38 мс	—	238[15]
	259	1,5 с	—	245,2 (60)

Элемент	A	$T_{1/2}$ [13—17]	$\bar{\nu}_{\text{мгн}}$ [18]	$E_{\text{к}}$, МэВ [19]
$_{101}$Md	255	$\geqslant 5\cdot10^{-2}$ лет	—	—
	256	$\geqslant 10^{-2}$ лет	—	—
	257	$\geqslant 6$ сут	—	—
	259	95 мин	—	203,9 (14)
$_{102}$No	250	$0{,}25\cdot10^{-3}$ с	—	—
	252	~ 8 с	,4,15 [23]	202,4
	254	~ 24 ч	—	—
	256	10^3 с	—	—
	258	$1{,}2\cdot10^{-3}$ с	—	—
$_{103}$Lr	256	$\geqslant 10^5$ с	—	—
$_{104}$Ku	254	$5\cdot10^{-4}$ с	—	—
	255	$\sim 4{,}5$ с	—	—
	256	$7\cdot10^{-3}$ с	—	—
	257	47 с	—	—
	258	$13\,(3)\cdot10^{-3}$ с	—	—
	259	3 с	—	—
	260	0,02—0,08 [16, 34]	—	199
	261	70 с	—	—
	262	$47\cdot10^{-3}$ с	—	—
$_{105}$Ns	257	$\geqslant 8$	—	—
	260	~ 15 с	—	—
	261	~ 7 с	—	—
	262	47 с	—	—
106	259	> 2с	—	—
	260	$7\cdot10^{-3}$ с	—	—
	263	~ 1 с	—	—
107	261	10^{-2} с	—	—

*1 Значение экстраполировано от полученного при измерениях с тепловыми или быстрыми нейтронами.

Таблица 40.4. **Периоды полураспада ядер $T_{1/2}$ из изомерных состояний путем спонтанного деления [22, 24] (в тех случаях, когда к одному нуклиду приведены два значения $T_{1/2}$, они относятся к разным изомерным состояниям)**

Ядро	$T_{1/2}$, с	Ядро	$T_{1/2}$, с
^{236}U	$1{,}16\cdot10^{-7}$	^{237}Am	$5\cdot10^{-9}$
^{238}U	$\geqslant 10^{-9}$	^{238}Am	$3{,}5\cdot10^{-5}$
	$1{,}95\cdot10^{-7}$	^{239}Am	$1{,}6\cdot10^{-7}$
^{228}Np	60	^{240}Am	$9\cdot10^{-4}$
^{237}Np	$4\cdot10^{-8}$	^{241}Am	$1{,}5\cdot10^{-6}$
^{235}Pu	$3\cdot10^{-8}$	^{242}Am	$1{,}4\cdot10^{-2}$
^{236}Pu	$3{,}4\cdot10^{-8}$	^{243}Am	$5{,}5\cdot10^{-6}$
^{236}Pu	$3{,}7\cdot10^{-11}$	^{244}Am	$1{,}0\cdot10^{-3}$
^{237}Pu	$1{,}1\cdot10^{-6}$	^{245}Am	$6{,}4\cdot10^{-7}$
^{237}Pu	$1{,}1\cdot10^{-7}$	^{246}Am	$7{,}3\cdot10^{-5}$
^{238}Pu	$6\cdot10^{-9}$	^{240}Cm	$5{,}5\cdot10^{-8}$
	$5\cdot10^{-10}$		10^{-11}
^{239}Pu	$8\cdot10^{-6}$	^{241}Cm	$1{,}5\cdot10^{-8}$
^{240}Pu	$3{,}4\cdot10^{-9}$	^{242}Cm	$1{,}8\cdot10^{-7}$
^{241}Pu	$3\cdot10^{-8}$		$5\cdot10^{-11}$
	$2{,}1\cdot10^{-5}$	^{243}Cm	$4{,}2\cdot10^{-8}$
^{242}Pu	$5\cdot10^{-8}$	^{244}Cm	$> 1\cdot10^{-7}$
	$3{,}6\cdot10^{-9}$		$\leqslant 5\cdot10^{-12}$
^{243}Pu	$6\cdot10^{-8}$	^{245}Cm	$1{,}3\cdot10^{-8}$
^{244}Pu	$3{,}8\cdot10^{-10}$	^{242}Bk	$9{,}5\cdot10^{-9}$
^{245}Pu	$9\cdot10^{-8}$		$6\cdot10^{-7}$
^{232}Am	85	^{244}Bk	$8{,}2\cdot10^{-7}$
^{234}Am	150	^{245}Bk	$2\cdot10^{-9}$

40.4. СЕЧЕНИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

В табл. 40.5 и 40.6 приведены сечения деления σ_f ядер под действием тепловых нейтронов. Значения, помеченные звездочкой, рекомендованы для энергии $E_n = 0{,}0253$ эВ ($v = 2200$ м/с); $\overline{E}_n$ — средняя энергия нейтронов деления. Значения, отмеченные буквой р, получены для распределения нейтронов в реакторе. На рис. 40.1—40.4 даны зависимости $\sigma_f(E_n)$ для основных делящихся ядер и ^{238}U.

В табл. 40.6 представлены сечения делений ядер при облучении тепловыми нейтронами. С ростом энергии нейтронов сечения деления хорошо делящихся ядер таких ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu сначала спадают, испытывая ряд резонансных подъемов и при энергии нейтронов 1—5 МэВ образуют первое плато (рис. 40.1, 40.3, 40.4). Ядра второй группы, такие как ^{232}Th, ^{238}U, ^{240}Pu, ^{242}Pu и другие, начинают хорошо делиться лишь при некоторой энергии выше $E_n^{\text{пор}}$. Их сечения деления сначала круто возрастают, а затем достигают насыщения, первого плато. При повышении энергии нейтронов свыше 5 МэВ характер изменения сечения деления двух групп ядер подобен: при энергиях нейтронов ~ 8—14 МэВ сечения деления образуют второе плато, затем третье и т. д.

При резонансных измерениях в сечениях деления таких «пороговых» ядер как ^{236}U, ^{238}U, ^{237}Np, ^{240}Pu,

Таблица 40.5. **Сечения деления σ_f ядер под действием тепловых нейтронов и числа вторичных нейтронов $\bar{\nu}_{мгн}$, испускаемых на акт деления**

Ядро-мишень	σ_f, 10^{-28} м² [18]	$\bar{\nu}_{мгн}$ [6,18]
^{223}Ra	0,7 (3)	—
^{226}Ra	$< 5 \cdot 10^{-5}$	—
^{228}Ra	< 2	—
^{227}Ac	$< 2{,}9 \cdot 10^{-4}$	—
^{227}Th	202 (13)	—
^{228}Th	$< 0{,}3$	—
^{229}Th	30,8 (15)	2,08(2)
^{230}Th	$< 1{,}2 \cdot 10^{-3}$	—
^{232}Th	$2{,}5 \cdot 10^{-6}$	2,12 (10)
^{233}Th	15 (2)	—
^{234}Th	$< 0{,}01$	—
^{230}Pa	1500 (250)	—
^{231}Pa	0,020 (1)	—
^{232}Pa	700 (100) p	—
^{233}Pa	$< 0{,}1$	—
^{234}Pa^m	< 500	—
^{234}Pa^g	< 5000	—
^{230}U	25 (10)	—
^{231}U	400 (300)	—
^{232}U	76,8(48)*	—
^{233}U	529,1 (12)* [25]	2,480 (7)
^{234}U	$< 0{,}65$	—
^{235}U	582,6 (11)* [25]	2,407 (7)
^{236}U	0,07*	2,338 (22)
^{237}U	$< 0{,}35$	—
^{238}U	$(4 \div 11) \cdot 10^{-6}$	—
^{239}U	14 (3)	—
^{234}Np	900 (300)	—
^{236}Np	2500 (150)	3,12 (14)
^{237}Np	0,0215 (24)*	2,525 (16)
^{238}Np	2088 (30)	—
^{236}Pu	170 (35)	—
^{237}Pu	2455 (295)	—
^{238}Pu	17,9 (4)*	2,900 (20)
^{239}Pu	748,0 (20)* [25]	2,874 (7)
^{240}Pu	0,056 (30)	2,921 (12)
^{241}Pu	1011,1 (62)* [25]	—
^{242}Pu	0,0007* [26]	—
^{243}Pu	196 (16)	—
^{241}Am	3,20 (9)*	—
^{242}Am^m	6950 (280)*	3,260 (24)
^{242}Am^g	2100 (200)	—
^{243}Am	0,1983 (43)	3.214 (38)
^{244}Am^m	1600 (300)	—
^{244}Am^g	2300 (300)	—
^{242}Cm	< 5	—
^{243}Cm	617 (20)*	3,430 (40)
^{244}Cm	1,04 (20)*	—
^{245}Cm	2145 (58)*	3,717 (60)
^{246}Cm	0,14 (5)*	—
^{247}Cm	81,9 (44)	3,79 (15)
^{248}Cm	0,37 (5)	—
^{250}Bk	960 (150)	—
^{249}Cf	1642 (33)*	4,06 (4)
^{251}Cf	4895 (250)	—
^{252}Cf	32 (4)	—
^{253}Cf	1300 (240)	—
^{254}Es^m	1826 (80)	—
^{254}Es^g	1966 (160)	—
^{255}Fm	3360 (170)	—
^{257}Fm	2950 (160)	

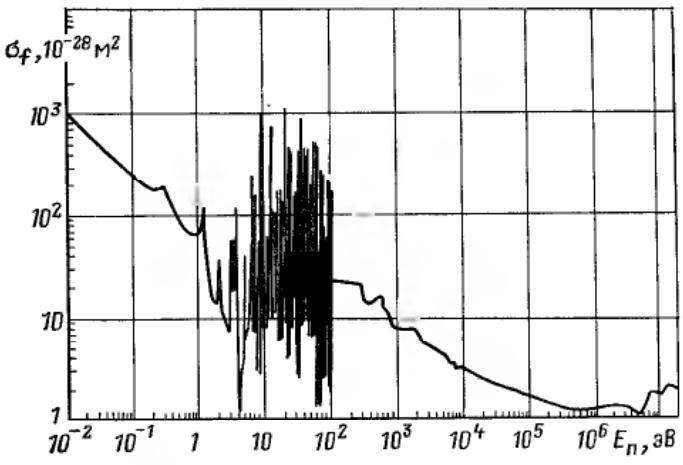


Рис. 40.1. Зависимость сечения деления ^{235}U от энергии нейтронов [27]

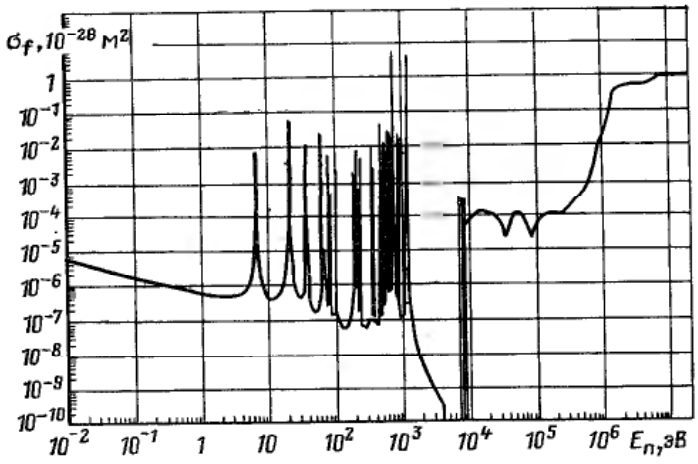


Рис. 40.2. Зависимость сечения деления ^{238}U от энергии нейтронов [27]

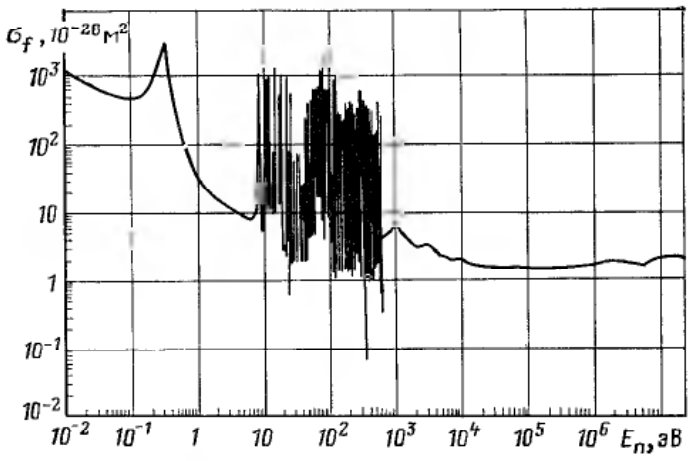


Рис. 40.3. Зависимость сечения деления ^{239}Pu от энергии нейтронов [27]

^{242}Pu была обнаружена промежуточная структура, а у ядер ^{230}Th и других — подбарьерные резонансы. Пример промежуточной структуры в сечении деления ядер ^{238}U приведен на рис. 40.2. Эти явления нашли объяснения в модели двугорбого барьера [3, 14]. В табл. 40.6 приведен ряд основных характернстик делящихся ядер при взаимодействии ^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu с тепловыми нейтронами. Значення сечений деления основных делящихся ядер при взаимодействии с нейтронами 0,1—20 МэВ приведены в [3].

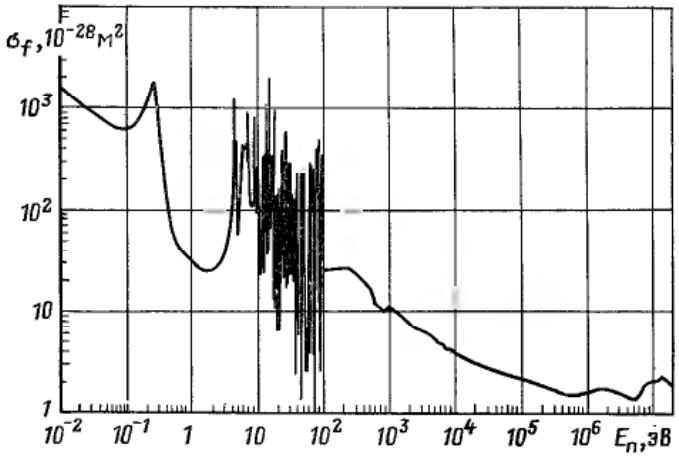


Рис. 40.4. Зависимость сечения деления ^{241}Pu от энергии нейтронов [27]

Таблица 40.6. **Константы взаимодействия делящихся ядер с нейтронами, имеющими скорость $v = 2200$ м/с [25]**

Характеристика	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu	^{241}Pu
σ_γ, 10^{-28} м^2	45,5 (7)	98,3 (8)	269,3 (22)	358,2 (51)
σ_f, 10^{-28} м^2	529,1 (12)	582,6 (11)	748,0 (20)	1011,1 (62)
$\sigma_{погл}$, 10^{-28} м^2	574,7 (10)	680,9 (11)	1017,3 (29)	1369,4 (77)
$\nu_{мгн}$ [6]	2,480 (7)	2,407 (7)	2,874 (7)	2,921 (12)
$\nu_{зап}$	0,0066 (30)	0,01659 (55)	0,00622 (32)	0,01563 (160)
$\nu_{погл}$	2,4933 (39)	2,4251 (34)	2,8768 (57)	2,9369 (73)
$\overline{E}_n$, МэВ	2,0627 (248)	2,0266 (220)	2,0990 (232)	2,0858 (232)

40.5. ЭНЕРГИЯ, ВЫДЕЛЯЕМАЯ ПРИ ДЕЛЕНИИ

Суммарная энергия, выделяемая при делении ядер, складывается из следующих составляющих:

кинетической энергии осколков деления $E_к$;
энергии мгновенных γ-квантов $E_{\gamma\ мгн}$;
энергии нейтронов деления E_n;
энергии β-излучения продуктов деления E_β;
энергии γ-излучения продуктов деления E_γ;
энергии, уносимой антинейтрино при β-распадах $E_{\bar{\nu}}$.

Таблица 40.7. **Энергия, выделяющаяся при делении ядер, МэВ (среднее значение на одно деление; энергия, уносимая запаздывающими нейтронами, $E_{n\ зап} \approx 10$ кэВ в табл. 40.7 не учтена)**

Ядро-мишень	Частица и ее энергия, МэВ	Мгновенное излучение			Запаздывающее излучение			$E_{полн}$	Литература
		$E_к$	E_n	E_γ	E_β	E_γ	$E_{\bar{\nu}}$		
^{197}Au	^{16}O, 135	156	80	12	3	4	5	—	[9]
^{209}Bi	^{22}Ne, 175	171	90	12	3	4	5	—	[9]
^{226}Ra	p, 12	159	20	6	5	5	7	—	[9]
^{232}Th	n, 3,35	161,8	4,7	6,1	8,1	7,86	10,9	199,46	[7]
	n, 14,0	161,8	7,4	6,1	7,2	6,99	9,7	199,14	[7]
^{233}U	n, тепловая	171,5	4,9	7,6	5,1	4,9	6,8	200,8	[7]
	n, 0,5	169,4	4,9	7,6	5,0	4,9	6,8	198,6	[7]
	n, 14,0	169,4	7,5	7,6	4,3	4,1	5,7	198,6	[7]
	α, 30	176	36	8	3	4	5	—	[9]
^{235}U	n, тепловая	172,7	4,8	6,9	6,4	6,2	8,6	205,2	[7]
	n, 0,5	169,8	4,8	6,9	6,4	6,2	8,6	202,8	[7]
	n, 14,0	169,8	7,3	6,9	5,3	5,2	7,1	201,7	[7]
^{236}U	n, 2,82	170,4	5,3	6,3	6,9	6,7	9,3	204,6	[7]
^{238}U	n, 3,10	170,3	5,5	6,3	8,2	8,0	11,0	209,3	[7]
	n, 14,0	170,3	7,1	6,3	7,1	6,9	9,5	207,2	[7]
^{237}Np	u, 2,37	173,0	6,1	6,4	5,5	5,4	7,4	203,9	[7]
^{239}Pu	n, тепловая	178,6	5,9	7,8	5,3	5,1	7,1	209,8	[7]
	n, 0,5	176,1	5,9	7,8	5,2	5,1	7,0	207,2	[7]
	n, 14,0	176,1	7,5	7,8	4,3	4,2	5,7	205,5	[7]
^{240}Pu	n, 2,39	179,0	6,2	6,5	5,7	5,6	7,7	207,7	[7]

Продолжение табл. 40.7

Ядро-мишень	Частица и ее энергия, МэВ	Мгновенное излучение			Запаздывающее излучение			$E_{полн}$	Литература
		$E_к$	E_n	E_γ	E_β	E_γ	E_ν		
^{241}Pu	n, тепловая	175,4	6,0	7,9	6,5	6,4	8,8	210,9	[7]
	n, 0,5	175,6	6,0	7,9	6,5	6,3	8,7	211,0	[7]
^{242}Pu	n, 2,32	176,8	4,6	6,5	6,6	6,4	8,9	209,9	[7]
^{252}Cf	Спонтанное деление	190,0	7,4	8,4	6,0	5,9	8,1	225,8	[7]
^{256}Fm	То же	198	32	8	8	8	12	—	[9]

Энергия, уносимая антинейтрино, в виде тепловой не выделяется, поэтому на один акт деления ^{235}U тепловыми нейтронами приходится около 196 МэВ, т. е. при мощности 1 Вт происходит примерно $3{,}2 \cdot 10^{10}$ делений в секунду. При делении 1 кг ^{235}U выделяется энергия $8 \cdot 10^{13}$ Дж.

В табл. 40.7 и 40.8, а также на рис. 40.5 приведены значения энергий, выделяемых при делении различных ядер.

Таблица 40.8. **Средняя суммарная кинетическая энергия осколков деления ядер при взаимодействии с тепловыми нейтронами [19]**

Ядро-мишень	$E_к$, МэВ	Ядро-мишень	$E_к$, МэВ
^{229}Th	162,7 (5)	^{243}Am	177,5 (6)
^{231}Pa	165,1 (5)	^{245}Cm	184,5 (5)
^{232}U	169,3 (5)	^{249}Cf	189,4 (5)
^{237}Np	171,0 (7)	^{251}Cf	185,0 (27)
^{238}Pu	178,1 (5)	^{254}Es	194,6 (5)
^{241}Am	180,0 (4)	^{255}Fm	195,7 (29)

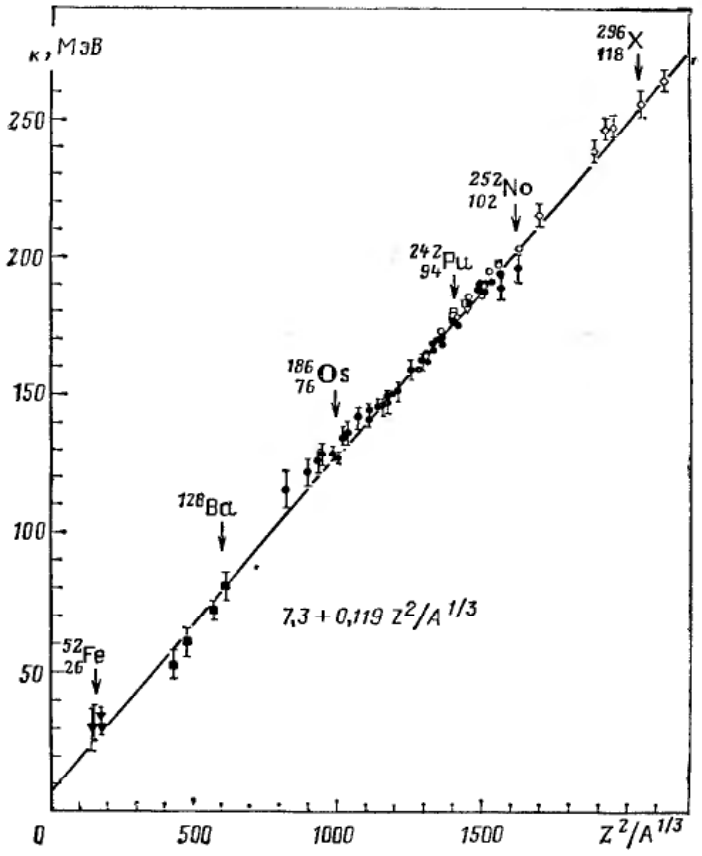


Рис. 40.5. Зависимость полной кинетической энергии $E_к$ осколков деления от $Z^2/A^{1/3}$ делящегося ядра [28]

40.6. ПРОДУКТЫ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Независимым выходом называют непосредственный выход осколков при делении ядра. Полный выход (рис. 40.6) складывается из независимого выхода и той доли, которая образуется в результате цепочки β-распадов.

В табл. 40.9 даны пробеги осколков деления ядер.

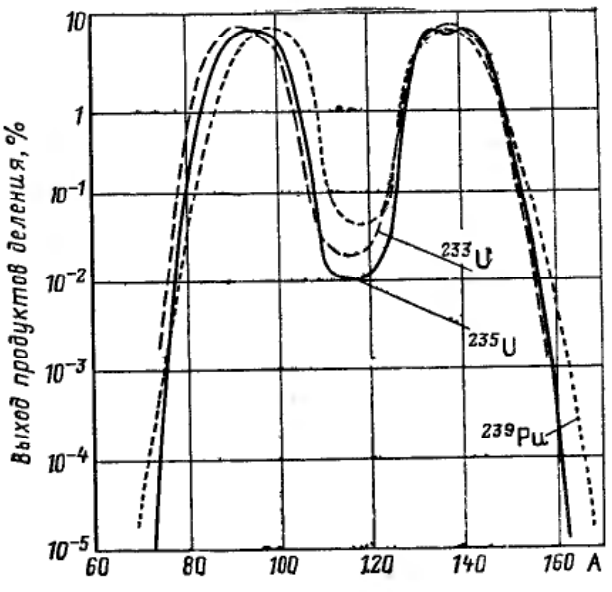


Рис. 40.6. Полные выходы продуктов деления, образующихся при делении ^{233}U, ^{235}U и ^{239}Pu тепловыми нейтронами (вся кривая нормирована на 200%) [20]

Таблица 40.9. **Средние пробеги осколков деления ядер $\overline{R}$, мг/см², при торможении в различных средах [6] ($\overline{R}_л$ — пробег легкого осколка, $\overline{R}_т$ — пробег тяжелого осколка)**

Тормозящая среда	$^{235}U + {}^{1}_{0}n_{тепл}$			^{252}Cf, спонтанное деление	
	$\overline{R}$	$\overline{R}_л$	$\overline{R}_т$	$\overline{R}_л$	$\overline{R}_т$
Алюминий	—	4,17	3,22	4,16	3,44
Аргон [30]	4,123	4,45	3,84	—	—
Вода	21 мкм [29]	—	—	—	—
Воздух	2,16 см	2,45 см	2,03 см	2,32 см*2	1,90 см*2
Гелий [30]	1,252	1,38	1,14	—	—
Железо	4,22	—	—	—	—
Коллодий	20 мкм [29]	—	—	—	—
Лавсан	—	17,8 мкм *1	14,0 мкм*1	—	—
Медь	5,08	—	—	—	—
Никель	4,40	5,53	4,30	5,52	4,57
Серебро	—	7,33	5,50	7,28	5,82
Углерод	—	3,09	2,48	—	—
Уран	6,7 мкм [29]	10,64*2	8,44*2	—	—
Урана диоксид	9,9 мкм [29]	—	—	—	—
Урана окись-закись	13,7 мкм [29]	—	—	—	—
Цирконий	—	6,12	4,78	—	—

*1 Пробеги осколков при фоторазделении ядер, $E_{max} = 20$ МэВ.

*2 Пробеги осколков ^{99}Mo ($\overline{R}_л$) и ^{140}Ba ($\overline{R}_т$) соответственно.

40.7. НЕЙТРОНЫ ДЕЛЕНИЯ

Энергетические спектры мгновенных нейтронов деления различных ядер сходны. В простейшем виде, в пределах погрешностей эксперимента, спектры нейтронов деления могут быть представлены максвелловским распределением

$$N(E) = \left(2/\sqrt{\pi\theta^3}\right)\sqrt{E}\exp(-E/\theta),$$

где E — энергия нейтрона в лабораторной системе координат, а параметр θ связан со средней энергией спектра $\overline{E}$: $\overline{E} = 3\theta/2$ (табл. 40.10).

Таблица 40.10. **Средние энергии $\overline{E}$ энергетических распределений мгновенных нейтронов для различных ядер**

Ядро	Вид деления	$\overline{E}$, МэВ
^{233}U	Тепловыми нейтронами	2,0627 (248) [25]
^{235}U	То же	2,0266 (220) [25]
^{239}Pu	»	2,0990 (232) [25]
^{240}Pu	Спонтанное	1,86 [20]
^{241}Pu	Тепловыми нейтронами	2,0858 (232) [25]
^{252}Cf	Спонтанное	2,1409

Среднее число мгновенных нейтронов $\overline{\nu}_{мгн}$, возникающих при делении ядра, имеет тенденцию увеличиваться с возрастанием энергии нейтронов E_n, вызывающих деление (рис. 40.7). Эта зависимость может быть представлена выражением $\overline{\nu}(E_n) = \overline{\nu}_0 + aE_n$, где $\overline{\nu}_0$ — среднее число мгновенных нейтронов при делении тепловыми нейтронами. Параметр $a \approx 0{,}15$, он слабо зависит от энергии нейтрона.

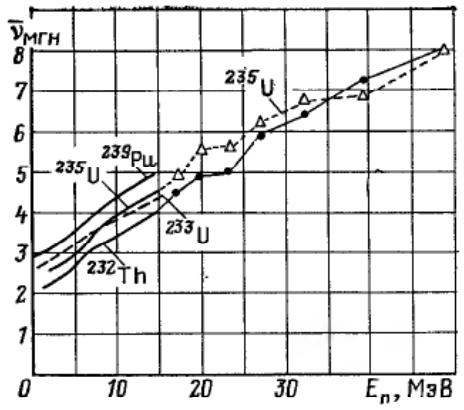


Рис. 40.7. Среднее число мгновенных нейтронов деления ^{232}Th [21, 31], ^{233}U [20], ^{235}U [23, 31], ^{239}Pu [23, 32]

40.8. МГНОВЕННОЕ γ-ИЗЛУЧЕНИЕ

Энергия возбуждения осколков деления, остающаяся после испускания мгновенных нейтронов, обычно равна 3—4 МэВ/осколок. Это возбуждение осколков снимается испусканием мгновенных γ-квантов. Процесс излучения происходит за время порядка 10^{-9}—10^{-14} с вслед за испусканием нейтронов.

Спектр γ-квантов и полные энергии $E_{\gamma\ полн}$ мгновенных γ-квантов, образующихся при делении некоторых ядер, приведены в табл. 40.11 и 40.12.

Таблица 40.11. **Спектр мгновенных γ-квантов, сопровождающих деление ^{235}U тепловыми нейтронами [20] [$N(E_\gamma)$ — число γ-квантов, испускаемых при делении внутри энергетического интервала шириной 0,1 МэВ, $E_{эф} = E_\gamma N(E_\gamma)$]**

E_γ, МэВ	$N(E_\gamma)$	$E_{эф}$, МэВ/деление
0,1	0,176	0,0176
0,2	0,815	0,1630
0,3	0,697	0,2091
0,4	0,661	0,2644
0,5	0,662	0,3110
0,6	0,553	0,3318
0,7	0,474	0,3318
0,8	0,408	0,2464
0,9	0,353	0,3177
1,0	0,310	0,310
1,1	0,272	0,2992
1,2	0,240	0,2880
1,3	0,205	0,2665
1,4	0,180	0,2520
1,5	0,158	0,2370
1,6	0,139	0,2224
1,7	0,125	0,2125
1,8	0,113	0,2034
1,9	0,102	0,1938
2,0	0,113	0,2260
2,1	0,0818	0,1718
2,2	0,0726	0,1597
2,3	0,0651	0,1497
2,4	0,0579	0,1390
2,5	0,0512	0,1280
2,6	0,0457	0,1188
2,7	0,0409	0,1104
2,8	0,0369	0,1033
2,9	0,0330	0,0957
3,0	0,0298	0,0894
3,1	0,0268	0,0831
3,2	0,0244	0,0781
3,3	0,0219	0,0723
3,4	0,0198	0,0673
3,5	0,0181	0,0634
3,6	0,0165	0,0594
3,7	0,0150	0,0555
3,8	0,0136	0,0517
3,9	0,0126	0,0491
4,0	0,0116	0,0464
4,1	0,0106	0,0435
4,2	0,00985	0,0414
4,3	0,00908	0,0391
4,4	0,00830	0,0365
4,5	0,00764	0,0344
4,6	0,00704	0,0324
4,7	0,00649	0,0305
4,8	0,00604	0,0290
4,9	0,00556	0,0272
5,0	0,00519	0,0260
5,1	0,00470	0,0240
5,2	0,00430	0,0224
5,3	0,00399	0,0217
5,4	0,00371	0,0200
5,5	0,00341	0,0188
5,6	0,00314	0,0176
5,7	0,00290	0,0165
5,8	0,00264	0,0153
5,9	0,00243	0,0143
6,0	0,00223	0,0134
6,1	0,00204	0,0124
6,2	0,00188	0,0117
6,3	0,00172	0,0108
6,4	0,00157	0,0100
6,5	0,00139	0,0090
6,6	0,00128	0,0084
6,7	0,00115	0,0077
6,8	0,00103	0,0070
6,9	0,000916	0,0063
7,0	0,000833	0,0058
7,1	0,000731	0,0052
7,2	0,000629	0,0045
7,3	0,000547	0,0040
7,4	0,000467	0,0034
7,5	0,000388	0,0029
7,6	0,000308	0,0023

Продолжение табл. 40.11

Таблица 40.12. **Полная энергия $E_{\gamma\ полн}$ мгновенных γ-квантов, образующихся при делении некоторых ядер [20] ($\overline{N}_\gamma$ — среднее число γ-квантов, приходящихся на одно деление, E_n — энергия нейтронов, вызывающих деление)**

Ядро	E_n, МэВ	$\overline{N}_\gamma$	$E_{\gamma\ полн}$, МэВ
^{235}U	Тепловая	7,4 (8)	7,2 (8)
	2,8	—	7,5 (11)
	14,7	—	7,5 (11)
^{238}U	2,8	—	7,5 (11)
	14,7	—	7,5 (11)
^{252}Cf	Спонтанное деление	10,3	8,2

40.9. ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

β- и γ-Излучение продуктов деления. β- и γ-Излучение продуктов деления является следствием распада более 100 радионуклидов, поэтому часто рассматривают совокупное β- или γ-излучение в момент времени t после деления, усредненное по многим актам деления. Зависимость интенсивности распада, МэВ·с$^{-1}$·деление$^{-1}$, продуктов деления от времени может быть приближенно представлена выражениями

$$A_\beta(t) \approx 1{,}4\, t^{-1{,}2};\ A_\gamma(t) \approx 8{,}2 t^{-1{,}2},$$

где t — время после деления, с. Эти выражения справедливы для интервала $10 < t < 10^7$ с с погрешностью ±20% (рис. 40.8—40.10).

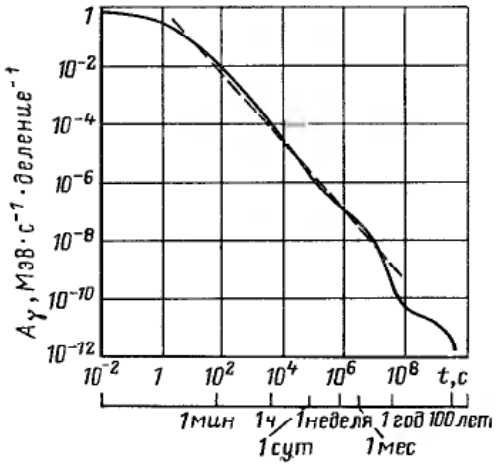


Рис. 40.8. Зависимость интенсивности γ-излучения продуктов деления от времени [20]

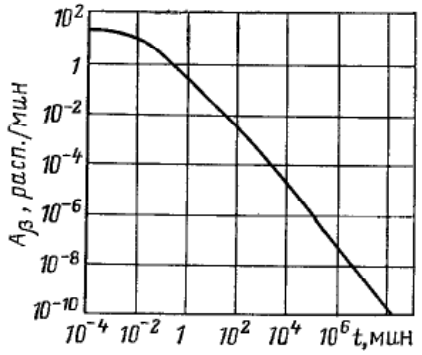


Рис. 40.9. Зависимость интенсивности β-излучения продуктов деления от времени [20]

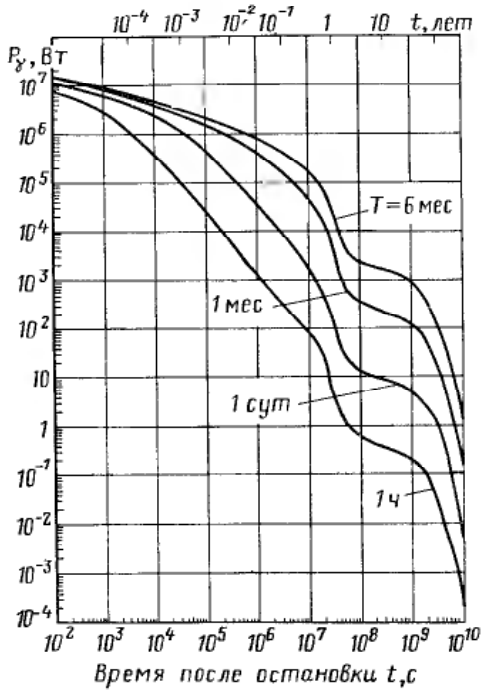


Рис. 40.10. Мощность источников γ-излучения — продуктов деления из активной зоны реактора, работавшего в течение времени T с тепловой мощностью 1 ГВт [33]

Запаздывающие нейтроны. Нейтроны, испускаемые возбужденными осколками деления, в соответствии с периодами полураспада родоначальников запаздывающих нейтронов условно делятся на группы. Чаще выделяют шесть групп (см., например, рис. 40.11 и табл. 40.13). Родоначальниками запаздывающих нейтронов обычно называют первые β-активные осколки деления, а продукты распада осколков называются излучателями запаздывающих нейтронов. Периоды полураспада и выходы нейтронов для одного и того же делящегося ядра слабо зависят от энергии нейтрона (до $E \approx 5$ МэВ), вызывающего деление. Полные выходы запаздывающих нейтронов приведены в табл. 40.14 и на рис. 40.12.

Таблица 40.13. **Относительный $I_{отн}$ выход запаздывающих нейтронов в группах на один акт деления при делении изотопов урана и плутония тепловыми нейтронами [20]**

Нуклид	Номер группы	$T_{1/2}$, с	$I_{отн}$
^{233}U	1	55,00 (54)	0,086
	2	20,57 (38)	0,299
	3	5,00 (21)	0,252
	4	2,13 (20)	0,278
	5	0,615 (242)	0,051
	6	0,277 (47)	0,034
	Полный выход		1,000
^{235}U	1	55,72 (128)	0,033
	2	22,72 (71)	0,219
	3	6,22 (23)	0,196
	4	2,30 (9)	0,395
	5	0,610 (83)	0,11
	6	0,230 (25)	0,042
	Полный выход		1,000
^{239}Pu	1	54,28 (234)	0,035
	2	23,04 (1,67)	0,298
	3	5,60 (40)	0,211
	4	2,13 (24)	0,326
	5	0,618 (213)	0,086
	6	0,257 (45)	0,044
	Полный выход		1,000
^{241}Pu	1	54,0 (10)	0,009
	2	23,2 (5)	0,233
	3	5,6 (6)	0,176
	4	1,97 (10)	0,397
	5	0,43 (4)	0,185
	6	—	—
	Полный выход		1,000

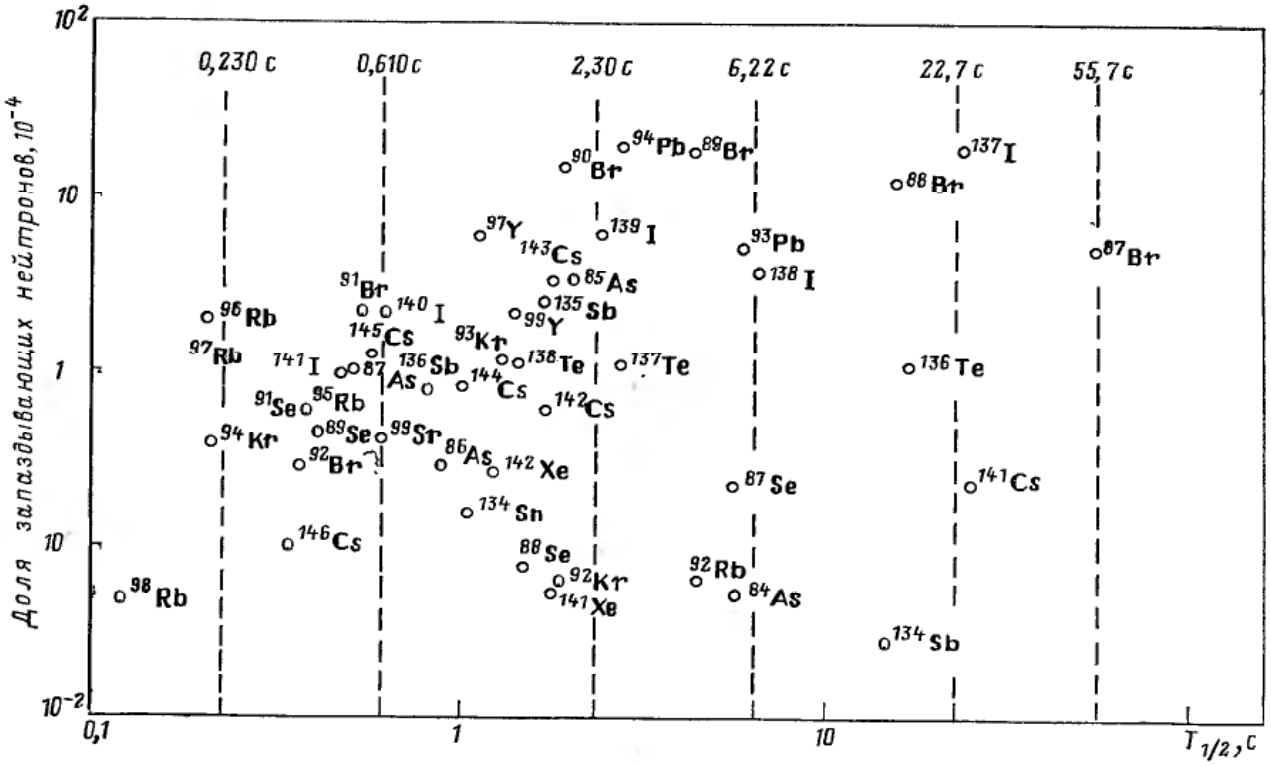


Рис. 40.11. Характеристики излучателей запаздывающих нейтронов [9]

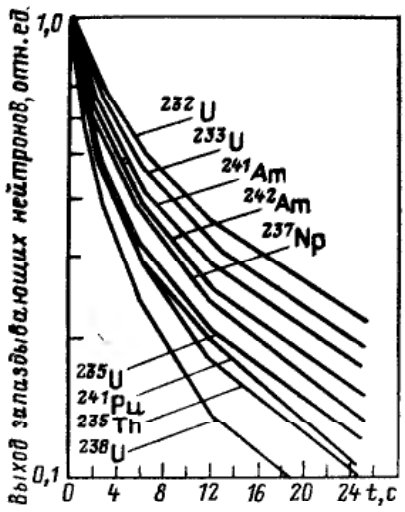


Рис. 40.12. Зависимость выхода запаздывающих нейтронов от времени для различных делящихся ядер [9]

Таблица 40.14. **Число запаздывающих нейтронов на 100 делений и средняя энергия запаздывающего нейтрона $\overline{E}_{n\,\text{зап}}$ [32]** [(т), (р), (14) означают деление ядер при облучении тепловыми, реакторными нейтронами и нейтронами с энергией 14 МэВ соответственно, (сп) — спонтанное деление ядра]

Ядро	N_n	$\overline{E}_{n\,\text{зап}}$, кэВ
^{232}Th (р)	4,76 (0,34)	424,6
^{232}Th (14)	3,03 (0,29)	457,9
^{233}U (т)	0,845 (0,066)	407,7
(р)	0,916 (0,089)	394,8
(14)	0,708 (0,095)	389,4
^{235}U (т)	1,77 (0,081)	415,8
(р)	1,98 (0,18)	517,6
(14)	0,978 (0,097)	400,8
^{236}U (р)	2,26 (0,19)	424,0
^{238}U (р)	3,51 (0,27)	421,9
(14)	2,69 (0,21)	428,5
^{237}Np (р)	1,28 (0,13)	418,5
^{239}Pu (т)	0,769 (0,058)	419,8
(р)	0,724 (0,009)	412,9
(14)	0,387 (0,062)	383,2
^{240}Pu (р)	0,923 (0,108)	416,6
^{241}Pu (т)	1,58 (0,13)	428,1
(р)	1,49 (0,16)	426,7
^{242}Pu (р)	1,41 (0,14)	420,0
^{252}Cf (сп)	0,690 (0,092)	409,8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hahn O., Strassmann F.**// Naturwissenschoften, 1939 Bd 27, Heft 1. S. 11—15.

2. **Флеров Г. Н., Петржак К. А.**//Журн. эксперим. теорет. физ. 1940. Т. 10, вып. 9—10. С. 1013—1017.

3. **Обухов А. И., Перфилов Н. А.**//Успехи физ. наук. 1967. Т. 92, вып. 4. С. 621—677.

4. **Хайд Э.** Деление ядер: Пер. с англ./Под. ред. В. М. Струтинского. М.: Атомиздат, 1969.

5. **Vandenbosch R., Huisenga J. R.** Nuclear Fission. N. Y. — London: Academic Press, 1973.

6. **Горбачев В. М., Замятнин Ю. С., Лбов А. А.** Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер: Справочник. М.: Атомиздат, 1976.

7. **Michaudon A.** Basic Physics of the Fission Process. Nuclear Fission and Neutron-Induced Fission Gross Sections/Ed. by A. Michaudon. Oxford. Pergamon Press, 1981.

8. **Пик-Пичак Г. А.** Деление ядер//Физическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1988. Т. 1. С. 578—581.

9. **Гангрский Ю. П., Далхсурен Б., Марков Б. Н.** Осколки деления ядер. М.: Энергоатомиздат, 1986.

10. **Bjornholm S., Lynn J. E.**//Rev. Mod. Phys. 1980. Vol. 52, N 4. P. 725—931.

11. **Игнатюк А. В., Смиренкин Г. Н., Иткис М. Г. и др.**//Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1985. Т. 16, вып. 4. С. 709—772.

12. **Plasil F., Awes T. C., Cheynis B. e. a.**//Phys. Rev. C. 1984. Vol. 29, № 3. P. 1145—1148.

13. **Proposed** Recommended List of Heavy Elements Radionuclide Decay Data//Ed. by A. Lorenz. INDC (NDC)—149/NE. Vienna. IAEA, 1983. Part 1. Half-Lives. P. 5—12.

14. **Brown E., Firestone R. B.** Tabbes of Radioactive Isotopes/Ed. V. C. Shirley. N. Y.: A. Wiley—Intercience Publ. 1986.

15. **Tuli J. K.** Nuclei properties//Handbook on Nuclear Activation Data Tech. Rep. Vienna: IAEA, 1987. Ser. N 273. P. 3—27.

16. **Sommerville L. P., Nurmia M. J., Nitschke J. M. e. a.**//Phys. Rev. C. 1985. Vol. 31, N. 5. 1801—1815.

17. **Дружинин А. А., Полынов В. Н., Корочкин А. Н. и др.**//Атомная энергия. 1985. Т. 56, вып. 1. С. 68—69.

18. **Mughabhabh S. F.** Neutron Gross Section. BNL-325. N. Y.: Academic Press, 1984. Vol. 1. Neutron Resonances Parameters and Thermal Gross Sections. Part B: $Z=61 \div 100$.

19. **Воробьева В. Г., Кузьминов Б. Д.**//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. 1975. Вып. 19. С. 16—41; 1985. Вып. 2. С. 27—30.

20. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

21. **Малиновский В. В., Тарасько М. З., Кузьминов Б. Д.**//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. 1985. Вып. 1. С. 24—35; Вып. 2. С. 36—41; Атомная энергия. 1985. Т. 58, вып. 6. С. 430.

22. **Флеров Г. Н.**//Производство изотопов/Под ред. В. В. Бочкарева, Н. Е. Брежнева, Е. Е. Кулиша и др. М.: Атомиздат, 1973. С. 19—25.

23. **Малиновский В. В., Воробьева В. Г., Кузьминов Б. Д.**//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. 1983. Вып. 5. С. 19—56.

24. **Metag V.**//Comments Nucl. Particle Phys. 1981. Vol. 10, N 2. P. 79—90.

25. **Devadeenam M., Stehn J. R.**//Ann. Nucl. Energy. 1984. Vol. 11, N 8. P. 375—404.

26. **Коньшин В. А.** Ядерно-физические константы делящихся ядер: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1984.

27. **Asami T.** Graphs of Evaluated Neutron Cross Sections in JENDL-2, JAERI-H-84-052. Japanese Nuclear Data Committee, Toaki, Ibaraki, 1984.

28. **Viola V. E., Kwiatkowski K., Walker M.**//Phys. Rev. C. 1985. Vol. 31, N 44. P. 1550—1552.

29. **Steinberg M.**//Nucleonics. 1963. Vol. 21, N 8. P. 151—153.

30. **Rustichelli F.**//Z. Phys. 1973. Bd 262, N 3. S. 211—220.

31. **Howe R. E.**//Nucl. Sci. Engng. 1984. Vol. 86, N 2. P. 157—167.

32. **England T. R., Wilson W. B., Scheuter R. E., Mann F. M.**//Nucl. Sci. Engng. 1983. Vol. 85, N 2. P. 139—155.

33. **Бродер Д. Л., Попков К. К., Рубанов С. Н.** Малогабаритная защита реакторов. М.: Атомиздат, 1967.

34. **Друин В. А., Бочев Б., Короткин Ю. С.**//Атомная энергия. 1977. Т. 43. Вып. 3. С. 155—161.

35. **Price P. B., Stevenson J. D., Barwick S. W. e. a.**//Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 54, N 4. P. 297—299.

36. **Barwick S. W., Price P. B., Stevenson J. D. e. a.**//Phys. Rev. C. 1985. Vol. 31, N 5. P. 1984—1986.

Глава 41
ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

С. В. Марин

41.1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В главе представлены ядерно-физические константы, характеризующие взаимодействие нейтронов с ядрами среды в энергетической области от 0,0253 эВ примерно до 20 МэВ. Перечень приводимых ядерно-физических констант далеко не полностью отражает всю совокупность существующих в настоящее время данных, и поэтому для получения информации, например, по параметрам резонансов, угловым и энергетическим распределениям вторичных нейтронов или другим данным следует обратиться к спецнальной справочной литературе или к библиотекам оцененных нейтронных данных. В них приводятся рекомендованные значения ядерно-физических констант в форме, допускающей их периодическую переоценку, пригодные для использования в расчетах при решении широкого круга задач. К наиболее известным библиотекам оцененных нейтронных данных относятся ENDF/B [1], ENDL [2], UKNDL [3], KEDAK [4] и др. При поиске требуемой информации рекомендуется пользоваться библиографическим указателем по нейтронным данным CINDA — Computer Index of Neutron Data [5], принятым в 1965 г. в качестве основного документа для международного обмена библиографической информацией. Подробное описание механизма ядерных реакций с участием нейтронов можно найти в работах по ядерной и нейтронной физике (см., например, [6—11]). Решение задач переноса нейтронов наиболее полно изложено в литературе по физике и технике ядерных реакторов [12—16].

41.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРОНА

При рассмотрении процесса переноса нейтронов в среде учитывается, что времена, характерные для взаимодействия нейтрона с ядрами среды, значительно меньше его периода полураспада. Поэтому нейтрон в данном случае считается долгоживущей и устойчивой частицей.

В свободном состоянии нейтрон радиоактивен. Ниже приведены основные характеристики нейтрона:

масса покоя $m_n = 1{,}674\,9286(10)\cdot 10^{-27}$ кг [17];

энергетический эквивалент массы покоя нейтрона $E^0_{m_n} = m_n c^2 - 939{,}573\ 1(27)$ МэВ [11];

заряд $|q_n| < 10^{-21}|q_e|$, q_e — заряд электрона [18];

схема распада $n_0 \longrightarrow p^+ + e^- + \tilde{\nu}$;

период полураспада $T_{1/2} = 10{,}13(9)$—$10{,}69(13)$ мин [11];

граничная энергия β-спектра $E_{гр} = 782{,}43(4)$ кэВ [11];

спин $S_n = \pm 1/2$ [11];

магнитный момент $\mu_n = 1{,}913\ 042\ 75(45)\,\mu_N$ [17];

комптоновская длина волны $\lambda_{C,\,n} = h/m_n c = 1{,}319\ 590\ 9(22)\cdot 10^{-15}$ м [17].

Верхняя оценка значения электрического дипольного момента нейтрона d_n, полученная в экспериментах с ультрахолодными нейтронами, дает отношение $d_n/e < 6\cdot 10^{-27}$ [11]. Нейтрон принято считать электрически нейтральной или обладающей очень малым электрическим зарядом (порядка $10^{-19}\,q_e$) частицей.

Для нейтрона как элементарной частицы характерно проявление волновых свойств, для описания которых с частицей связывается волна с длиной λ, м, определяемой соотношением де Бройля

$$\lambda = h/p = 2{,}86\cdot 10^{-11}/\sqrt{E_n}\ ,$$

где h — постоянная Планка; p — импульс нейтрона; E_n — энергия нейтрона, эВ. Соотношение справедливо в случае малой релятивистской поправки (рис. 41.1). Отклонение от прямой линии наблюдается при энергиях выше 10^8 эВ и обусловлено релятивистскими эффектами при высоких энергиях. Волновые свойства наиболее отчетливо проявляются при низких энергиях; например, при $E_n = 0{,}0253$ эВ значение λ сравнимо с размерами атома (табл. 41.1). Нейтроны таких энергий дифрагируют на кристаллической решетке подобно рентгеновскому излучению [19].

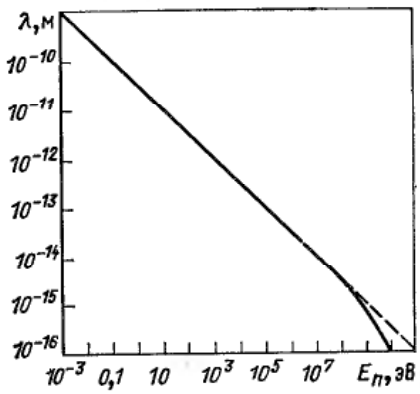


Рис. 41.1. Зависимость длины волны нейтрона от энергии [8]

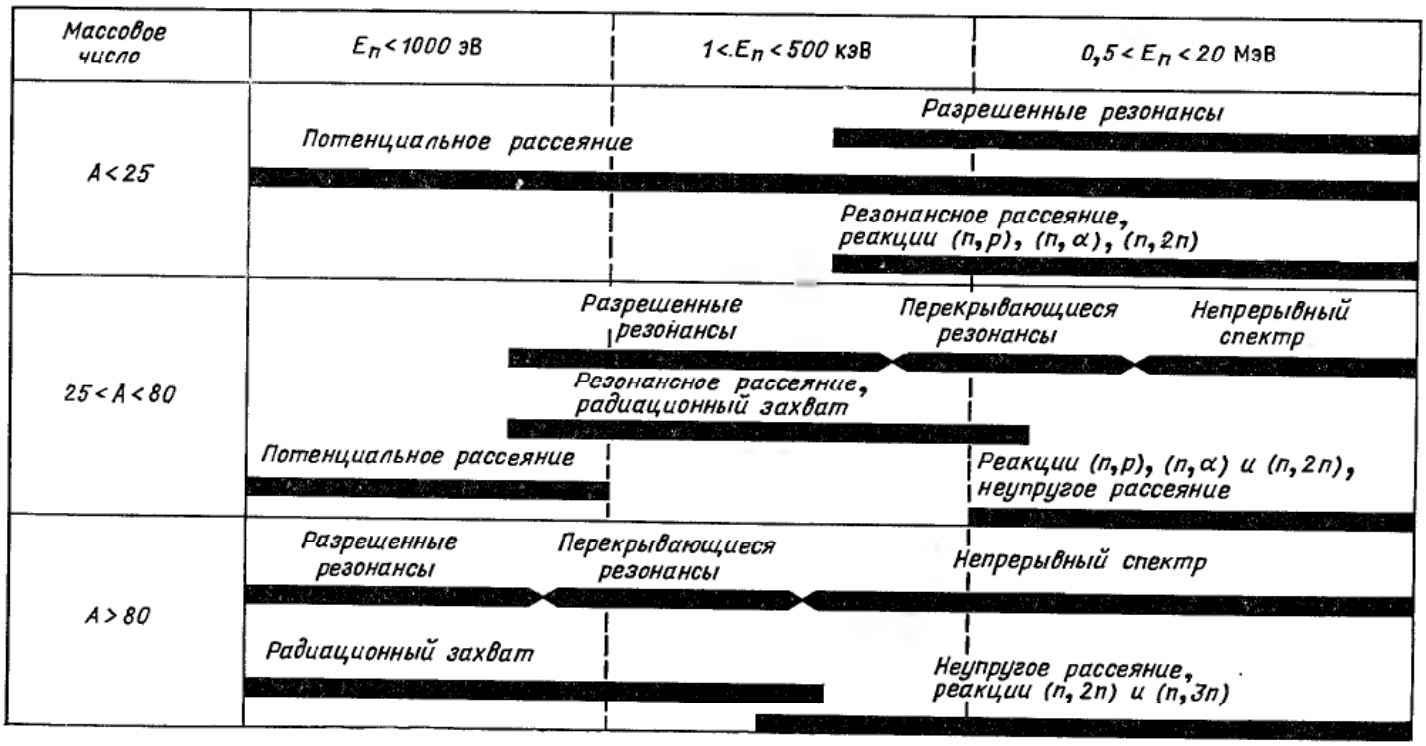


Рис. 41.2. Систематика ядерных реакций с участием нейтронов [9]

Таблица 41.1. **Некоторые характеристики нейтронов различных энергий [8]**

Группа		Энергия, эВ	Температура, К	Скорость, м/с	Длина волны, м
Ультрахолодные	($< 10^{-7}$ эВ)	10^{-7}	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$	0,44	$0{,}9 \cdot 10^{-8}$
Холодные	(10^{-7}—10^{-2} эВ)	10^{-3}	11,6	$4{,}37 \cdot 10^{2}$	$9{,}04 \cdot 10^{-10}$
Тепловые	(0,01—0,1 эВ)	0,0253	293	2200	$1{,}80 \cdot 10^{-10}$
Резонансные	(0,1—50 эВ)	1,0	$1{,}16 \cdot 10^{4}$	$1{,}38 \cdot 10^{4}$	$2{,}86 \cdot 10^{-11}$
Медленные	(50—500 эВ)	100	$1{,}16 \cdot 10^{6}$	$1{,}38 \cdot 10^{5}$	$2{,}86 \cdot 10^{-12}$
Промежуточные	(500—10^5 эВ)	10^{4}	$1{,}16 \cdot 10^{8}$	$1{,}38 \cdot 10^{6}$	$2{,}86 \cdot 10^{-13}$
Быстрые	(10^5—10^7 эВ)	10^{6}	$1{,}16 \cdot 10^{10}$	$1{,}38 \cdot 10^{7}$	$2{,}86 \cdot 10^{-14}$
Больших энергий	(10^7—10^9 эВ)	10^{8}	$1{,}16 \cdot 10^{12}$	$1{,}28 \cdot 10^{8}$	$2{,}79 \cdot 10^{-15}$
Релятивистские	($> 10^9$ эВ)	10^{10}	$1{,}16 \cdot 10^{14}$	$2{,}99 \cdot 10^{8}$	$1{,}14 \cdot 10^{-16}$

Энергией нейтронов определяется вид их взаимодействия с ядрами среды (рис. 41.2). При анализе данных, представленных на рис. 41.2, следует учитывать, что границы энергетических интервалов носят условный характер и перекрываются.

41.3. НЕЙТРОННЫЕ СЕЧЕНИЯ

Для описания ядерных реакций под действием нейтронов используется запись [20]

$$n + \mathrm{X} \rightarrow \mathrm{Y} + b + Q,$$

что соответствует взаимодействию нейтрона с ядром X, в результате чего образуются ядро Y и частица b, которая может быть сложным ядром. Тепловой эффект, или энергия реакции Q, равна разности масс частиц до и после реакции:

$$Q = E_b + E_{\mathrm{Y}} - E_n,$$

где E_{Y} и E_b — кинетические энергии продуктов реакции.

Если $Q > 0$, то реакция называется экзоэнергетической и протекает при любой кинетической энергии нейтрона. Если $Q < 0$, то реакция эндоэнергетическая, она не может происходить до тех пор, пока энергия нейтрона не превзойдет значения, называемого пороговой энергией реакции $E_{\text{пор}}$:

$$E_{\text{пор}} = \begin{cases} |Q| \text{ в системе центра масс (СЦМ);} \\ |Q|\,(M+1)/M \text{ в лабораторной системе координат (ЛСК),} \end{cases}$$

где M — масса ядра X, выраженная в нейтронных массах.

Микроскопическое сечение взаимодействия σ_i реакции типа i рассматривается как число событий данного типа i в единицу времени, отнесенное к одному ядру вещества и деленное на число частиц, попадающих в единицу времени на поверхность единичной площади. В расчетах часто используется величина

$$\Sigma_i = \rho\sigma_i,$$

где Σ_i — в см^{-1}; ρ — концентрация ядер в веществе, г/см^3; σ_i — микроскопическое сечение, см^2. В литературе по нейтронной физике иногда встречается внесистемная единица сечения барн, которая связана с единицей СИ соотношением 1 б $= 10^{-28}$ м^2. Макроскопическое сечение Σ_i рассматривается как вероятность нейтрона испытать акт рассеяния или поглощения на отрезке длиной 1 см.

Полный результат взаимодействия может быть представлен как сумма эффектов упругого рассеяния и неупругих взаимодействий либо как сумма упругого и неупругого эффектов рассеяния и эффекта поглощения нейтронов. Неупругое взаимодействие включает в себя неупругое рассеяние и поглощение нейтронов.

Приведем символическую запись (рис. 41.3):

полное сечение $\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{n,n} + \sigma_x = \sigma_s + \sigma_{\text{abs}}$;

сечение рассеяния $\sigma_s = \sigma_{n,n} + \sigma_{n\ldots}$,

сечение неупругих взаимодействий $\sigma_x = \sigma_{n,n'} + \sigma_{\text{abs}}$;

сечение поглощения $\sigma_{\text{abs}} = \sigma_{n,f} + \sigma_{n,2n} + \sigma_{n,3n} + \sigma_{n,np} + \sigma_{n,\gamma} + \sigma_{n,p} + \sigma_{n,\alpha} \ldots$;

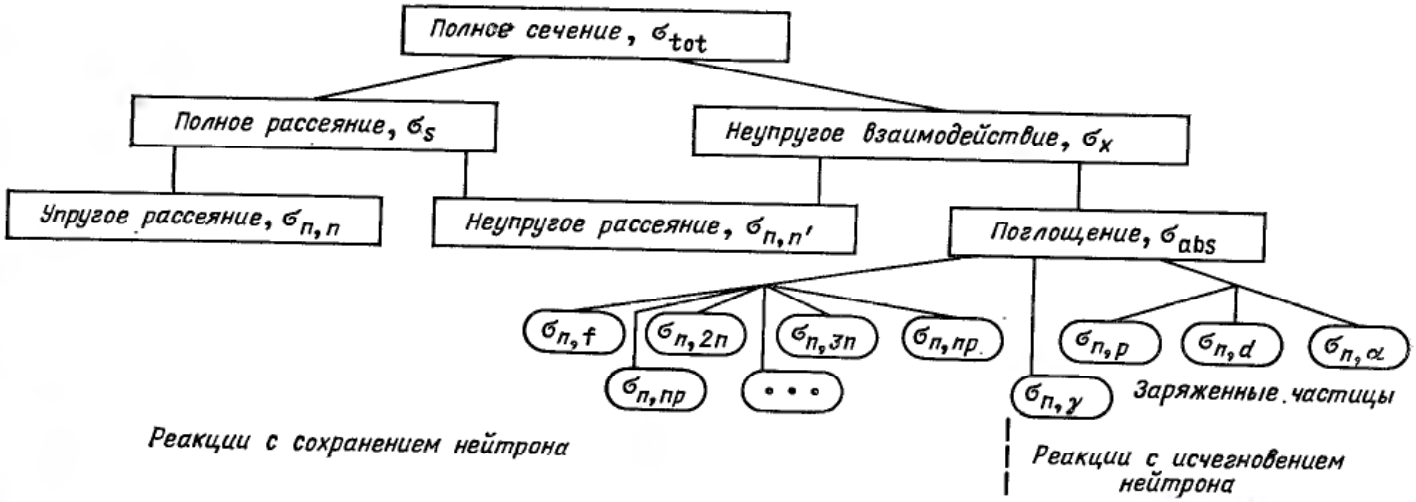


Рис. 41.3. Схема взаимосвязи нейтронных сечений [26]

сечение процессов, приводящих к испусканию нейтронов, $\sigma_{em}=\sigma_{n,n'}+2\sigma_{n,2n}+3\sigma_{n,3n}+\nu\sigma_{n,f}+\sigma_{n,np}+\ldots$;

сечение процессов, связанных с образованием нейтронов, $\sigma_p=\sigma_{n,n}+\sigma_{em}$.

Здесь $\sigma_{n,n}$ и $\sigma_{n,n'}$ — сечения упругого и неупругого рассеяния нейтронов; $\sigma_{n,2n}$ и $\sigma_{n,3n}$ — сечения реакций $(n, 2n)$, $(n, 3n)$; $\sigma_{n,f}$ — сечение деления; $\sigma_{n,\gamma}$ — сечение радиационного захвата; $\sigma_{n,p}$, $\sigma_{n,d}$, $\sigma_{n,\alpha}$, $\sigma_{n,np}$,... — сечения реакций (n, p), (n, d), (n, α), (n, np), ... соответственно; ν — средний выход нейтронов при делении.

41.4. МЕХАНИЗМ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ С УЧАСТИЕМ НЕЙТРОНОВ

Ядерные реакции, происходящие при столкновении нейтронов с ядрами, характеризуются большим разнообразием и зависят от индивидуальных особенностей сталкивающихся частиц и энергии их относительного движения. Всю совокупность ядерных реакций условно можно разделить на две группы: реакции с образованием составного ядра и прямые ядерные реакции. Система, образующаяся из поглощенного нейтрона и ядра мишени и находящаяся в сильно возбужденном состоянии, называется составным ядром. Время жизни составного ядра составляет около 10^{-17} с, а энергия возбуждения равна сумме кинетической энергии и энергии связи поглощенного нейтрона. Энергия возбуждения составного ядра распределяется среди большого числа степеней свободы.

Согласно современным представлениям о ядерных реакциях считается, что процесс протекает в две стадии: образование составного ядра и распад составного ядра на продукты реакции, т. е.

$$n + X \rightarrow C \rightarrow Y + b,$$

где C — составное ядро, образующееся в промежуточной стадии. Распад составного ядра зависит от энергии, момента количества движения и четности и не зависит от способа образования составного ядра.

Однако возможен процесс, когда нейтрон, сталкиваясь с отдельным нуклоном ядра-мишени, с большой вероятностью покидает ядро без взаимодействия с другими нуклонами. Такой процесс называется прямой реакцией. В отличие от ядерной реакции с образованием составного ядра, когда возбуждается большое число степеней свободы, в прямой ядерной реакции возбуждается немного степеней свободы. При энергиях налетающих нейтронов меньше 20 МэВ вероятность этого процесса мала.

Реализуются также ядерные реакции, носящие промежуточный характер между прямыми реакциями и реакциями с образованием составного ядра. Ядро может распасться и до того момента, когда энергия, вносимая захваченной частицей, распределяется между всеми нуклонами ядра (предравновесный распад).

Распад составного ядра может происходить несколькими способами: с испусканием нейтрона той же энергии, что и поглощенная (упругое или резонансное рассеяние); с испусканием одного или нескольких γ-квантов (радиационный захват); с испусканием заряженных частиц или нейтронов в случае достаточно больших энергий возбуждения.

Отличительной особенностью ядерных реакций с образованием составного ядра при малых энергиях нейтронов (менее 1 МэВ) является наличие резонансов в энергетической зависимости сечений. Резонансное рассеяние обусловлено внутренней областью ядра, в то время как потенциальное рассеяние — поверхностью ядра. В этой области энергий наиболее существенны процессы с упругим рассеянием и радиационным захватом нейтронов. Другие процессы либо запрещены энергетически, либо характеризуются малой вероятностью. Неупругое рассеяние невозможно, если энергия падающего нейтрона меньше энергии возбуждения ядра (для ядер со средними массовыми числами энергии возбуждения, как правило, превосходит несколько десятков мегаэлектрон-вольт). Реакции (n, p), (n, α) и другие маловероятны из-за наличия кулоновского барьера, который препятствует испусканию заряженных частиц с малой энергией.

При взаимодействии нейтронов тепловых и резонансных энергий с ядрами тяжелых нуклидов наиболее существенны упругое рассеяние и радиационный захват, для некоторых тяжелых нуклидов — деление. Если энергия нейтронов выше 1 МэВ, то возможными становятся другие ядерные реакции, такие как неупругое рассеяние, реакции с испусканием заряженных частиц.

Процесс упругого рассеяния нейтрона представляется состоящим из двух частей; чисто резонансного с образованием составного ядра и потенциального рассеяния, при котором нейтрон не проникает в ядро, а отражается от его поверхности. Резонансное и потенциальное рассеяния когерентны и интерферируют. Согласно формуле Брейта — Вигнера для упругого рассеяния

$$\sigma_s(E) = \pi\lambda^2 \frac{\Gamma_n^2}{(E-E_R)^2+(\Gamma/2)^2} + 4\pi a^2 + 4\pi\lambda\Gamma_n a \frac{E-E_R}{(E-E_R)^2+(\Gamma/2)^2},$$

где λ — приведенная длина волны де Бройля ($\lambda=\lambda/2\pi$); Γ и Γ_n — полная и нейтронная ширины резонансов ($\Gamma=\Gamma_n+\Gamma_\gamma$ — ширина уровня, которая складывается из парциальных ширин: Γ_n — нейтронной ширины и Γ_γ — радиационной ширины; отношения Γ_n/Γ и Γ_γ/Γ — вероятности упругого рассеяния с образованием составного ядра и радиационного захвата соответственно; ширины резонансов берутся на половине высоты сечения в резонансе и выражаются в энергетических единицах); E_R — энергия резонанса; a — эффективный радиус ядра. Первое слагаемое соответствует резонансному рассеянию, второе — потенциальному рассеянию, третье — интерференции процессов потенциального и резонансного рассеяния. Видно, что при $E_R>E$ интерференционный член в формуле принимает отрицательное значение, что соответствует уменьшению сечения вследствие интерференции [9, 12].

Полное сечение рассеяния нейтрона часто рассматривается в виде суммы когерентного и некогерентного сечений [8]:

$$\sigma_s = \sigma_{s\,coh} + \sigma_{s\,noncoh}.$$

41.5. СЕЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ДЛЯ НЕЙТРОНОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

В табл. 41.2—41.4 приведены сечения ядерных реакций для нейтронов тепловых энергий (0,0253 эВ), полученные экспериментально или в результате сопоставления данных различных авторов.

В первой колонке указаны символ элемента и массовое число. Если массовое число отсутствует, то сечение проводится для естественной смеси изотопов данного элемента. Во второй колонке в случае долгоживущего

Таблица 41.2. **Сечения поглощения и рассеяния для нейтронов с энергией 0,0253 эВ (элементы с атомными номерами 1—60) [21]**

Символ и массовое число		Содержание в естественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2	σ_s, 10^{-28} м^2	$\sigma_{s\,coh}$, 10^{-28} м^2	$\sigma_{s\,noncoh}$, 10^{-28} м^2
H	1	99,985	$5{,}37\cdot10^{-5}$	0,3326 (7)	20,491 (14)	0,439 (3)	20,052 (14)
	2	0,0148	—	$0{,}519\ (7)\cdot10^{-3}$	3,390 (12)	2,484 (5)	0,906 (13)
He		—	$2{,}68\cdot10^{-5}$	—	0,76 (1)	—	—
	3	0,000138	—	$0.031\ (9)\cdot10^{-3}$	3,10 (13)	2,48 (4)	0,62 (12)
	4	99,999862	—	—	0,76 (1)	—	—
Li		—	0,0464	0,0448 (30)	0,95 (4)	—	0,25 (4)
				70,5 (1,9) (abs)			
	6	7,52	—	0,0385 (30)	0,75 (2)	0,45 (8)	0,30 (8)
				940 (4) (n, α)			
	7	92,48	—	0,0454 (3)	0,97 (4)	0,51 (1)	0,46 (4)
Be	7	53,30 сут	—	48 000 (9000) (n, p)	—	—	—
	9	100	0,1236	$7{,}6\ (8)\cdot10^{-3}$	6,151 (5)	—	0,004 (1)
B		—	0,136	0,10 (4)	4,27 (7)	3,01 (5)	1,26 (3)
	10	19,8	—	0,5 (2)	2,23 (6)	0.1180 (3)	2,11 (8)
				3837 (9) (abs)			
	11	80,2	—	$5{,}5\ (3{,}3)\cdot10^{-3}$	4,84 (4)	4,69 (3)	0,15 (3)
C		—	0,08023	$3{,}50\ (7)\cdot10^{-3}$	4,740 (5)	—	$0{,}3\ (1)\cdot10^{-3}$
	12	98,89	—	$3{,}53\ (7)\cdot10^{-3}$	4,746 (2)	—	—
	13	1,11	—	$1{,}37\ (4)\cdot10^{-3}$	4,19 (12)	4,16 (12)	0,029 (10)
	14	5730 лет	—	$<0{,}001$	—	—	—
N		—	$5{,}38\cdot10^{-5}$	$74{,}7\ (7{,}3)\cdot10^{-3}$	10,03 (8)	9,60 (4)	0,45 (11)
				1,90 (3) (abs)			
	14	99,63	—	$75{,}0\ (7{,}5)\cdot10^{-3}$	10,05 (12)	—	0,46 (5)
	15	0,366	—	$0{,}024\ (8)\cdot10^{-3}$	4,59 (5)		$3{,}5\cdot10^{-3}$
O		—	$5{,}38\cdot10^{-5}$	$0{,}19\ (2)\cdot10^{-3}$	3,761 (6)	3,761 (6)	—
	16	99,760	—	$0{,}190\ (19)\cdot10^{-3}$	3,761 (6)	—	—
	17	0,038	—	$0{,}538\ (65)\cdot10^{-3}$	3,61 (6)	—	0,007 (2)
				0,235 (10) (abs)			
	18	0,202	—	$0{,}16\ (1)\cdot10^{-3}$	—	—	—
F	19	100	$5{,}39\cdot10^{-5}$	$9{,}6\ (5)\cdot10^{-3}$	3,641 (10)	3,641 (10)	$0{,}40\ (2)\cdot10^{-3}$
Ne		—	$2{,}69\cdot10^{-5}$	$39\ (4)\cdot10^{-3}$	2,415 (10)	—	0,015 (5)
	20	90,51	—	$37\ (4)\cdot10^{-3}$	2,47 (3)	—	—
	21	0,27	—	0,666 (110)	5,1 (3)	—	—
				$<1{,}5$ (n, α)			
	22	9,22	—	$45{,}5\ (6{,}0)\cdot10^{-3}$	1,705 (9)	—	—
Na	23	100	0,02541	0,530 (5)	3,025 (2)	1,54 (2)	1,55 (3)
				0,400 (30)			
Mg		—	0,04310	0,063 (3)	3,4140 (24)	—	0,046 (6)
	24	78,99	—	0,051 (5)	3,74 (4)	—	—
	25	10,0	—	0,190 (30)	—	1,54 (12)	0,023
	26	11,01	—	0,0382 (8)	2,83 (17)	—	—
	27	9,46 мин	—	0,07 (2)	—	—	—
Al	27	100	0,06024	$231\ (3)\cdot10^{-3}$	1,4134 (10)	—	$9{,}8\ (6)\cdot10^{-3}$
Si		—	0,04996	0,171 (3)	2,0437 (17)	—	0,009 (2)
	28	92,23	—	0,177 (5)	1,992 (6)	—	—
	29	4,67	—	0,101 (14)	—	—	—
	30	3,10	—	0,107 (2)	2,49 (4)	—	—
P		—	0,03539	0,172 (6)	3,134 (10)	—	0,006 (4)
S		—	0,03950	0,52 (1)	0,9787 (50)	0,9733 (50)	$5{,}4\ (7)\cdot10^{-3}$
				$8\ (4)\cdot10^{-3}$ (n, α)			
	32	95,02	—	0,53 (4)	0,9432 (21)	—	—
				$7\ (4)\cdot10^{-3}$ (n, α)			
	33	0,75	—	0,35 (4)	2,8 (7)	2,7 (2)	—
				$2\ (1)\cdot10^{-3}$ (n, p)			
				$190\ (80)\cdot10^{-3}$ (n, α)			
	34	4,21	—	$227\ (5)\cdot10^{-3}$	—	1,45 (3)	
Cl		—	$5{,}45\cdot10^{-5}$	33,1 (3)	15,8 (2)	—	4,9 (2)
				0,37 (2) (n, p)			
				33,5 (3) (abs)			

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2	σ_s, 10^{-28} м^2	$\sigma_{s\ coh}$, 10^{-28} м^2	$\sigma_{s\ noncoh}$, 10^{-28} м^2
35	75,77	—	43,6 (4)	20,6 (3)	16,32 (25)	4,24 (25)
			0,489 (14) (n, p)			
			0,08 (4)·10^{-3} (n, α)			
36	3,00·10^5 лет	—	< 10,0	—	—	—
37	24,23	—	0,433 (6)	1,15 (5)	< 0,08·10^{-3}	—
Ar	—	2,68·10^{-5}	0,675 (9)	0,647 (3)	—	0,209 (2)
36	0,337		5,2 (5)	73,7 (4)	—	—
		—	5,5 (1)·10^{-3} (n,α)		—	—
37	35,0 сут		69 (14) (n, p)		—	—
		—	1970 (330) (n, α)			
38	0,063	—	0,8 (2)	1,5 (1,5)	—	—
39	269 лет	—	600 (300)		—	—
40	99,60	—	0,660 (10)	0,40 (2)	—	—
K	—	0,01325	2,1 (1)	2,04 (10)	—	0,37 (10)
39	93,258	—	2,1 (2)	—	—	0,34 (10)
			4,3 (5)·10^{-3} (n, α)			
40	0,0117	—	30 (8)	—	—	—
	1,28·10^9 лет	—	4,4 (3) (n, p)			
			0,39 (3) (n, α)			
41	6,730	—	1,46 (3)	—	—	0,7 (2)
Ca	—	0,02329	0,43 (2)	2,93 (4)	—	0,025 (3)
40	96,94	—	0,41 (2)	3,01 (8)	—	—
			2,5 (1,1)·10^{-3} (n, α)			
41	1,0·10^5 лет	—	4,0	—	—	—
42	0,647	—	0,680 (70)	1,2 (2)	—	—
43	0,135	—	6,2 (6)	—	—	—
44	2,09	—	0,88 (5)	—	—	—
45	165 сут	—	15,0	—	—	—
46	0,0035	—	0,74 (7)	—	—	—
48	0,187	—	1,09 (14)	—	—	—
Sc 45	100	0,03349	27,2 (2)	22,4 (4)	18,1 (3)	4,3 (4)
Ti	—	0,05670	6,09 (13)	4,09 (3)	1,34 (2)	2,75 (4)
46	8,2	—	0,59 (18)	2,78 (24)	—	—
47	7,4	—	1,7 (2)	3,1 (2)	1,3 (2)	1,8 (3)
48	73,7	—	7,84 (25)	4,1 (2)	—	—
49	5,4	—	2,2 (3)	0,7 (3)	0,08 (4)	—
50	5,2	—	0,179 (3)	3,7 (3)	—	—
V	—	0,07050	5,08 (4)	4,8 (1)	0,017 (1)	—
50	0,25	—	60 (40)	7,5 (1,0)	—	—
51	99,75	—	4,9 (1)	4,8 (2)	—	—
Cr	—	0,0801	3,07 (8)	3,38 (1)	1,63 (1)	1,75 (1)
50	4,35	—	15,9 (2)	—	2,41 (6)	—
52	83,79	—	0,76 (6)	2,96 (2)	—	—
53	9,50	—	18,2 (1,5)	7,78 (20)	2,10 (3)	5,68 (19)
54	2,36	—	0,36 (4)	2,54 (10)	—	—
Mn 55	100	0,08145	13,3 (2)	2,2 (2)	1,65 (2)	0,6 (2)
Fe	—	0,08487	2,56 (3)	11,35 (3)	—	0,38 (3)
54	5,8	—	2,25 (18)	2,17 (10)	—	—
56	91,72	—	2,59 (14)	12,46 (49)	—	—
57	2,2	—	2,48 (30)	—	—	—
58	0,28	—	1,28 (5)	—	—	—
Co	100	0,0890	37,18 (6)	6,00 (6)	0,96 (3)	5,04 (8)
60	5,271 года	—	2,0 (2)	—	—	—
60m	10,5 мин	—	58,0 (8,0)	—	—	—
Ni	—	0,08980	4,49 (16)	17,8 (4)	13,0 (3)	4,8 (2)
58	68,27	—	4,6 (3)	25,3 (4)	—	—
60	26,10	—	2,9 (2)	0,98 (7)	—	—
61	1,13	—	2,5 (8)	9,0 (1,0)	7,1 (1)	1,9 (3)
62	3,59	—	14,5 (3)	9,1 (4)	—	—
64	0,91	—	1,52 (3)	0,0014 (3)	—	—
65	2,52 ч	—	22,4 (2,0)	—	—	—

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2	σ_s, 10^{-28} м^2	$\sigma_{s\ coh}$, 10^{-28} м^2	$\sigma_{s\ noncoh}$, 10^{-28} м^2
Cu	—	0,08493	3,78 (2)	7,78 (3)	7,28 (1)	0,50 (4)
63	69,20	—	4,50 (2)	5,1 (2)	5,1 (2)	0,006 (1)
64	12,70 ч	—	<6000	—	—	—
65	30,80	—	2,17 (3)	14,1 (5)	13,7 (5)	0,36 (5)
66	5,10 мин	—	135 (10)	—	—	—
Zn	—	0,06572	1,11 (2)	4,08 (3)	4,00 (3)	0,075 (7)
64	48,6	—	0,76 (2)	3,9 (3)	—	—
			$0{,}015\ (1)\cdot10^{-3}$ (n, α)			
65	244,1 сут	—	250 (150)	—	—	—
66	27,9	—	0,85 (20)	4,9 (3)	—	—
67	4,1	—	6,8 (8)	—	—	—
			$0{,}006\ (4)\cdot10^{-3}$ (n, α)			
68	18,8	—	0,072 (4) [^{69m}Zn]	5,4 (3)	—	—
			1,0 (1) [^{69g}Zn]			
			$<0{,}020\cdot10^{-3}$ (n, α)			
70	0.62	—	$83{,}0\ (5{,}0)\cdot10^{-3}$ [^{71g}Zn]	—	—	—
			$8{,}7\ (5)\cdot10^{-3}$ [^{71m}Zn]		—	—
Ga	—	0,05105	2,90 (10)	6,50 (20)	—	—
69	60,1	—	1,68 (7)	—	—	—
71	39,9	—	4,71 (23)		—	—
Ge	—	0,04530	2,3 (2)	8,37 (6)	—	—
70	20,5	—	3,43 (20)	8,8 (8)	—	—
72	27,4	—	0,98 (9)	7,5 (7)	—	—
73	7,8	—	15 (2)	—	—	—
74	36,5	—	0,51 (8)	6,1 (4)	—	—
76	7,8	—	0,15 (2)	—	—	—
As 75	100	0,04606	4,5 (1)	5,43 (3)	5,37 (2)	0,06 (1)
Se	—	0,0343	11,7 (2)	8,56 (1,0)	8,22 (10)	0,34 (10)
74	0,87	—	51,8 (1,2)	—	—	—
76	9,0	—	85 (7)	18,4 (3)	—	—
77	7,6	—	42 (4)	8,43 (16)	—	—
78	23,5	—	0,43 (2)	8,40 (2)	—	—
80	49,6	—	0,61 (45)	6,95 (6)	—	—
82	9,2	—	0,039 (3)	5,0 (2)	—	—
	$1{,}4\cdot10^{20}$ лет		[70 с, ^{83m}Se]			
			0,0052 (4)			
			[22,5 мин, ^{83g}Se]			
Br	—	0,02351	6,9 (2)	6,1 (2)	—	0,1 (4)
79	50,69	—	11,0 (7)	—	—	—
81	49,31	—	2,7 (2)	—	—	—
Kr	—	$2{,}67\cdot10^{-5}$	25 (1)	7,50 (13)	—	—
78	0,356	—	0,17 (2)	—	—	—
			[50 с, ^{79m}Kr]			
			6,2 (9) [$^{79m+g}$Kr]			
80	2,27	—	11,5 (5)	—	—	—
82	11,6	—	28 (20)	—	—	—
83	11,5	—	180 (30)	—	—	—
84	57,0	—	0,110 (15)	—	—	—
85	10,7 года	—	1,66 (2)	—	—	—
86	17,30	—	0,003 (2)	—	—	—
			[76 мин, ^{87g}Kr]			
Rb	—	0,01078	0,38 (4)	6,4 (2)	6,25 (4)	—
85	72,17	—	0,48 (1)	—	6,2 (1)	—
87	27,83	—	0,120 (30)	—	6,6 (1)	—
	$4{,}8\cdot10^{10}$ лет					
Sr	—	0,01746	1,28 (6)	10 (1)	—	—
84	0,56	—	0,87 (7)	—	—	—
86	9,80	—	1,04 (7)	—	—	—
87	7,00	—	16 (3)	—	—	—
88	82,60	—	0,058 (4)	—	—	—
89	50,5 дня	—	0,42 (4)	—	—	—
90	28,8 года	—	0,9 (5)	—	—	—

Символ и массовое число		Содержание в естественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2	σ_s, 10^{-28} м^2	$\sigma_{s\,coh}$, 10^{-28} м^2	$\sigma_{s\,noncoh}$, 10^{-28} м^2
Y	89	100	0,03733	1,28 (2)	7,67 (6)	—	0,13 (2)
	90	64,1 ч	—	$< 6,5$	—	—	—
	91	58,5 сут	—	1,4 (3)	—	—	—
Zr		—	0,03732	0,185 (3)	6,40 (4)	6,2 (2)	0,15 (3)
	90	51,50	—	0,011 (5)	5,3 (3)	—	—
	91	11,20	—	1,24 (25)	10,7 (6)	10,0 (6)	0,7 (1)
	92	17,10	—	0,220 (60)	—	—	—
	93	$1,5 \cdot 10^6$ лет	—	$1,3 < \sigma_{n\gamma} < 4,0$	—	—	—
	94	17,40	—	0,0499 (24)	6,1 (4)	—	—
	96	2,80	—	0,0229 (1)	6,6 (4)	—	—
Nb	93	100	0,05445	1,15 (5)	0,37 (7)	6,32 (4)	$6,20\,(6) \cdot 10^{-3}$
	94	$2 \cdot 10^4$ лет	—	14,9 (1,0) [35 сут, ^{95g}Nb] 0,6 (1) [87 ч, ^{95m}Nb]	—	—	—
	95	35 сут	—	$< 7,0$ [23,4 ч, ^{96}Nb]	—	—	—
Mo		—	0,06403	2,55 (5)	5,59 (4)	—	0,27 (12)
	92	14,80	—	0,019	—	—	—
	94	9,30	—	0,015	—	—	—
	95	15,90	—	14,0 (5)	—	—	—
	96	16,70	—	0,5 (2)	—	—	—
	97	9,60	—	2,1 (5)	—	—	—
	98	24,10	—	0,130 (6)	—	—	—
	100	9,60	—	0,199 (3)	—	—	—
Tc	99	$2,14 \cdot 10^5$ лет	—	20 (1) [15,8 с, ^{100g} Tc]	—	—	—
Ru		—	0,07270	2,56 (13)	6,5 (1)	—	—
	96	5,50	—	0,29 (2)	—	—	—
	98	1,86	—	$< 8,0$	—	—	—
	99	12,7	—	7,1 (1,0)	—	—	—
	100	12,6	—	5,0 (6)	—	—	—
	101	17,0	—	3,4 (9)	—	—	—
	102	31,6	—	1,21 (7)	—	—	—
	104	18,7	—	0,32 (2)	—	—	—
	105	4,44 ч	—	0,39 (6)	—	—	—
	106	367 сут	—	0,146 (45)	—	—	—
Rh	103	100	0,07263	145 (2) [$^{104m+g}$Rh]	—	—	—
	104	42,3 с	—	40 (30)	—	—	—
	105	35,4 ч	—	11 000 (3000) [29,8 с, ^{106g}Rh] 5000 (1000) [130 мин, ^{106m}Rh]	—	—	—
Pd		—	0,06906	6,9 (4)	4,2 (2)	—	0,091 (9)
	102	1,00	—	3,4 (3)	—	—	—
	104	11,00	—	0,6 (3)	—	—	—
	105	22,20	—	20 (3)	5 (6)	—	—
	106	27,30	—	0,292 (29) [$6,5 \cdot 10^6$ лет, ^{107g} Pd] 0,013 (2) [213 с, ^{107m}Pd]	5,1 (6)	—	—
	107	$6,5 \cdot 10^6$ лет	—	1,8 (2)	—	—	—
	108	26,70	—	8,3 (5) [13,5 ч, ^{109g}Pd] 0,183 (33) [4,7 мин, ^{109m}Pd]	—	—	—
	110	11,80	—	0,190 (30) [23,4 мин, ^{111g}Pd] 0,037 (6) [5,5 ч, ^{111m}Pd]	—	—	—
Ag		—	0,05857	63,3 (4)	5,08 (3)	—	0,55 (4)
	107	51,83	—	37,6 (1,2) [$^{108m+g}$Ag]	7,44 (9)	—	0,12 (3)
	109	48,17	—	91,0 (1,0) [$^{110m+g}$Ag]	2,55 (6)	—	0,32 (5)
	110m	249,9 сут	—	82 (11)	—	—	—

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2	σ_s, 10^{-28} м^2	$\sigma_{s\ coh}$, 10^{-28} м^2	$\sigma_{s\ noncoh}$, 10^{-28} м^2
Cd	—	0,04635	2520 (50)$^{(abs)}$	5,6 (6)	—	—
106	1,25	—	~ 1	—	—	—
108	0,89	—	1,1 (3)	—	—	—
109	464 сут	—	700 (100) 0,05$^{(n,\alpha)}$	—	—	—
110	12,50	—	11 (1) [$^{111m+g}$Cd]	—	—	—
111	12,80	—	24 (3)	5 (1)	—	—
112	24,10	—	2,2 (5)	7 (1)	—	—
113g	12,20 $9\cdot10^{15}$ лет	—	20 600 (400)	—	—	—
114	28,70	—	0,30 (2) [53,4 ч, ^{115g}Cd] 0,036 (7) [44,8 сут, ^{115m}Cd]	6 (1)	—	—
116	7,50	—	0,050 (8) [2,40 ч, ^{117g}Cd] 0,025 (10) [3,4 ч, ^{117m}Cd]	—	—	—
In	—	0,03818	193,8 (1,5)	2,45 (20)	1,95 (10)	0,5 (1)
113	4,3	—	12,0 (1,1)	3,75 (7)	—	0,000037
115	95,7 $5.1\cdot10^{14}$ лет	—	202 (2)	2,6 (1)	—	0,6 (1)
Sn	—	0,03703	0,626 (9)	4,909 (6)	4,887 (3)	0,022 (5)
112	1,01	—	0,30 (4) [21 мин, ^{113m}Sn] 0,71 (10) [115,1 сут, ^{113g}Sn]	—	—	—
114	0,67	—	0,115 (30)	4,6 (5)	—	—
115	0,38	—	30 (7)	—	—	—
116	14,80	—	0,140 (30)	—	4,26 (15)	—
117	7,75	—	2,3 (5)	—	5,2 (4)	—
118	24,3	—	0,220 (50)	4,26 (15)	—	—
119	8,6	—	2,2 (5)	—	4,55 (38)	—
120	32,4	—	0,140 (30) [27,1 ч, ^{121g}Sn] 0,001 (1) [55 лет, ^{121m}Sn]	5,17 (16)	—	—
122	4,56	—	0,180 (20) [40,1 мин, ^{123m}Sn] 0,001 (1) [129 сут, ^{123g}Sn]	—	—	—
124	5,64	—	0,130 (5) [9,5 мин, ^{125m}Sn] 0,004 (2) [9,62 сут, ^{125g}Sn]	4,41 (30)	—	—
Sb	—	0,03076	5,1 (1)	4,2 (1)	4,03 (2)	0.17 (12)
121	57,3	—	5,9 (2) [$^{122m+g}$Sb]	—		
123	42,7	—	4,1 (1) [^{124g} Sb]	—		
Te	—	0,02841	4,7 (1)	—	3,74 (6)	0,2 (2)
120	0,091	—	2,0 (3) [^{121g} Te]	—	—	—
122	2,5	—	3,4 (5)	—	—	—
123	0,89	—	418 (30) $0{,}046\ (6)\cdot10^{-3}$ $^{(n,\alpha)}$	—	—	—
124	4,60	—	6,8 (1,3)	3,8 (4)	—	—
125	7,00	—	1,55 (16)	—	4 (4)	—
126	18,70	—	1,04 (15)	—	—	—
128	31,70	—	0,215 (8)	—	—	—
130	34,50 $2\cdot10^{21}$ лет	—	0,02 (1) [30 ч, ^{131m}Te] 0,27 (6) [25 мин, ^{131g}Te]	—	—	—
I	—	0,02340	894 (90) [13 сут, ^{126g}I]	—	—	—

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или (н) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2	σ_S, 10^{-28} м^2	$\sigma_{S\,coh}$, 10^{-28} м^2	$\sigma_{S\,noncoh}$, 10^{-28} м^2
126	13 дней	—	5960	—	—	—
127	100	—	6,2 (2) [25 мин, ^{128g}I]	—	3,54 (3)	~ 0,0
129	$1{,}6\cdot10^{7}$ лет	—	18 (2) [9,2 мин, ^{130m}I]	—	—	—
			9 (1) [12,36 ч, ^{130g}I]			
130	12,36 ч	—	18 (3) [8,04 сут, ^{131g}I]	—	—	—
131	8,04 сут	—	80 (50) [2,28 ч, ^{132g}I]	—	—	—
Xe	—	$2{,}68\cdot10^{-5}$	23,9 (1,2)	4,30 (2)	—	—
124	0,096	—	165 (20) [$^{125m+g}$Xe]	—	—	—
125	17 ч	—	$< 0{,}03^{(n,\alpha)}$	—	—	—
126	0,09	—	3,5 (8) [$^{127m+g}$Xe]	—	—	—
127	36,41 сут	—	$< 0{,}01^{(n,\alpha)}$	—	—	—
128	1,92	—	$< 8{,}0$ [$^{129m+g}$Xe]	—	—	—
129	26,4	—	21 (5)	—	—	—
130	4,1	—	$< 26{,}0$ [$^{131m+g}$Xe]	—	—	—
131	21,2	—	85 (10)	—	—	—
132	26,9	—	0,45 (6) [$^{133m+g}$Xe]	—	—	—
133	5,25 сут	—	190 (90)	—	—	—
134	10,4	—	0,265 (20) [$^{135m+g}$Xe]	—	—	—
135	9,10 ч	—	$2{,}65\ (11)\cdot10^{6}$	—	—	—
136	8,9	—	0,26 (2)	—	—	—
Cs	133 100	0,00847	29 (1,5) [$^{134m+g}$Cs]	—	—	0,22
134	2,062 года	—	140 (12)	—	—	—
135	$3{,}0\cdot10^{6}$ лет	—	8,5 (5) [13,1 сут, ^{136g}Cs]	—	—	—
137	30,17 года	—	0,110 (33) [32,2 мин, ^{138g}Cs]	—	—	—
Ba	—	0,01535	1,2 (1)	3,42 (4)	—	—
130	0,106	—	11,3 (1,0)	—	—	—
132	0,101	—	6,5 (8) [10,7 года, ^{133g}Ba]	—	—	—
			0,5 [38,9 ч, ^{133m}Ba]			
134	2,417	—	2,0 (1,6)	—	—	—
135	6,592	—	5,8 (9)	—	—	—
136	7,854	—	0,4 (4)	—	—	—
137	11,23	—	5,1 (4)	—	—	—
138	71,70	—	0,360 (36)	—	—	—
139	82,9 мин	—	6,2 (1,6)	—	—	—
140	12,79 сут	—	1,6 (3)	—	—	—
La	—	0,02667	8,97 (5)	10,13 (22)	8,64 (10)	1,49 (20)
138	0,089	—	57,2 (5,7)	—	—	—
	$1{,}1\cdot10^{11}$ лет					
139	99,911	—	8,93 (4)	10,13 (22)	8,64 (10)	1,49 (20)
140	40,3 ч	—	2,7 (3)	—	—	—
Ce	—	0,02966	0,63 (4)	4,7 (3)	—	—
136	0,19	—	0,95 (25) [34,4 ч, ^{137m}Ce]	—	—	—
			6,3 (1,5) [9,0 ч, ^{137g}Ce]			
138	0,254	—	0,015 (5) [56 с, ^{139m}Ce]	—	—	—
			1,1 (3) [137,2 сут, ^{139g}Ce]			
139	137,2 сут	—	500	—	—	—
140	88,50	—	0,57 (4)	2,83 (11)	—	—
141	35,2 сут	—	29 (3)	—	—	—
142	11,08	—	0,95 (5)	3,7 (2)	—	—
143	33,0 ч	—	6,0 (7)	—	—	—
144	284,9 сут	—	1,0 (1)	—	—	—
Pr 141	100	0,02769	11,5 (3) [$^{142m+g}$Pr]	2,54 (6)	—	—
142	19,2 ч	—	20 (3)	—	—	—
143	13,58 сут	—	90 (10)	—	—	—

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{28} см$^{-3}$	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2	σ_s, 10^{-28} см^2	$\sigma_{s\,coh}$, 10^{-28} м^2	σ_{sincoh}, 10^{-28} м^2
Nd	—	0,02914				
142	27,20	—	50,5(2,0)	16,0 (1,0)	—	11 (2)
143	12,20	—	18,7(7)	7,7 (5)	—	—
			325 (10)	80 (2)	—	—
144	23,80	—	17,4 (1,6)·10$^{-3(n,\alpha)}$		—	—
	$2{,}1\cdot10^{15}$ лет		3,6 (3)	1,0 (2)	—	—
145	8,30	—	4,2 (2)	—	—	—
146	17,20	—	<0,1·10$^{-3(n,\alpha)}$			
			1,4 (1)	—	—	—
147	11 сут	—	[11 сут, ^{147g}Nd]			
148	5,76	—	440 (150)	—	—	—
			2,5 (2)	4,0 (5)	—	—
150	5,64	—	[1,73 ч, ^{149g}Nd]			
			1,2 (2)	3,5 (5)	—	—
			[12.4 мин, ^{151g}Nd]			

Таблица 41.3. Сечения поглощения и рассеяния для нейтронов с энергией 0,0253 эВ (элементы с атомными номерами 61—89) [24]

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$ [23]	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2	σ_s, 10^{-28} м^2	σ_{tot}, 10^{-28} м^2
Pm	5,53 года	—			
147	2,6234 года	—	8400 (1680)	—	—
148*m*	41,3 сут	—	181 (7)	—	205 (7)
148	5,37 сут	—	22 000 (2500)	—	—
149	53,1 ч	—	2000 (1000)	—	—
151	28,4 ч	—	1400 (300)	—	—
			<700	—	—
Sm	—	0,0311			
144	3,30	—	5800 (100)	—	—
145	340 сут	—	0,7	—	—
147	15,10	—	~110	—	—
	$1{,}06\cdot10^{11}$ лет		64 (5)	11 (7)	75 (6)
148	11,30	—			
	$8\cdot10^{15}$ лет		2,7(6)	—	—
149	13,90	—			
150	7,4	—	41 000 (2000)	—	—
151	90 лет	—	102 (5)	—	133 (8)
152	26,60	—	15 000 (1800)	—	—
154	22,60	—	206 (6)	—	—
			5,5 (1,1)	—	—
Eu	—	0,0207			
151	47,9	—	4600 (100)	8,0 (1,0)	—
			9200 (100)	—	—
152	13 лет	—	9,0 (2,0)·10^{-6} (*n*, α)		
153	52,1	—	2300 (1000)	—	—
154	8,5 года	—	390 (30)	8,0 (2)	—
			1500 (400)	—	—
Gd	—	0,0305			
152	0,2	—	49 000 (1000)	—	—
	$1{,}1\cdot10^{14}$ лет		1100 (100)	—	—
			7,0·10^{-3} (*n*, α)		

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$ [23]	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2	σ_s, 10^{-28} м^2	σ_{tot}, 10^{-28} м^2
154	2,10	—	85 (12)	—	—
155	14,80	—	61 000 (500)	60	—
156	20,6	—	1,5 (1,2)	—	—
157	15,7	—	254 (2)·10³	1011	—
158	24,80	—	2,5 (5)	—	—
160	21,80	—	0,77 (2)	—	—
161	3,7 млн	—	31 000 (12 000)	—	—
Tb 159	100	0,0316	25,5 (1,1)	20(2)	—
160	72,1 сут	—	525 (100)	—	—
Dy —	—	0,0317	930 (20)	100 (10)	1030 (25)
156	0,057	—	33 (3) $< 9\cdot10^{-3}$ (n, α)	—	—
158	0,10	—	43 (6) $< 6\cdot10^{-3}$ (n, α)	—	—
160	2,3	—	61 (6) $< 0{,}3\cdot10^{-3}$ (n, α)	—	—
161	19,0	—	585 (30) $< 3\cdot10^{-5}$ (n, α)	22 (1)	—
162	25,5	—	180 (20)	2,5 (8)	—
163	24,9	—	130 (10) $< 2\cdot10^{-5}$ (n, α)	9,7 (4)	140 (10)
164	28,1	—	2700 (75)	347 (30)	—
165	2,33 ч	—	3900 (300)	—	—
Ho 165	100	0,0320	66,5 (3,3) $< 2\cdot10^{-5}$ (n, α)	9,4 (2)	—
Er —	—	0,0172	162 (8)	11,0 (8)	—
162	0,14	—	19 (2) $< 11\cdot10^{-3}$ (n, α)	3,8 (2,0)	—
164	1,56	—	13,2 $< 1{,}2\cdot10^{-3}$ (n, α)	12,1 (7)	—
166	33,4	—	35 (3) $< 7\cdot10^{-5}$ (n, α)	19,1 (1,0)	—
167	22,9	—	670 (30) $< 7\cdot10^{-5}$ (n, α)	7,9 (8)	—
168	27,1	—	1,95 (5) $< 9\cdot10^{-5}$ (n, α)	15,0 (8)	—
170	14,90	—	5,7 (2)	15,0 (8)	—
171	7,52 ч	—	280 (30)	—	—
Tm 169	100	0,0331	103 (3) $< 1\cdot10^{-5}$ (n, α)	12 (2)	—
170	128,6 сут	—	92 (4)	—	—
171	1,92 года	—	4,5 (2)	—	—
Yb —	—	0,0244	36,6 (2,0)	25,0 (8)	—
168	0,135	—	3470 (100) $< 4\cdot10^{-3}$ (n, α)	—	—
170	3,1	—	10 (1) $< 4\cdot10^{-5}$ (n, α)	—	—
171	14,4	—	50 (4) $< 4\cdot10^{-5}$ (n, α)	—	—
172	21,9	—	1,3 (8) $< 3\cdot10^{-5}$ (n, α)	—	—
173	16,2	—	19 (2)	—	—

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или (и) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$ [23]	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2	σ_s, 10^{-28} м^2	σ_{tot}, 10^{-28} м^2
174	31,60	—	65 (5) $< 2 \cdot 10^{-5}$ (n, α)	—	—
176	12,7	—	2,4 (2)	—	—
Lu —	—	0,0335	77 (3)	8,0 (2,0)	84,7 (5)
175	97,39	—	23,4 (2,0) $< 6 \cdot 10^{-5}$ (n, α)	—	—
176	2,61 $3{,}6 \cdot 10^{10}$ лет	—	2100 (50) $< 2 \cdot 10^{-3}$ (n, α)	—	—
Hf —	—	0,0449	102 (2)	8 (2)	110 (2)
174	0,16 $2 \cdot 10^{15}$ лет	—	390 (55)	—	—
176	5,2	—	38 (6)	—	—
177	18,60	—	365 (20)	—	372 (23)
178	27,1	—	86 (7)	—	91 (6)
179	13,7	—	45 (5)	—	51 (6)
180	35,2	—	12,6 (7)	—	—
Ta 180	0,0123	—	700 (200)	—	—
181	99,9877	0,0553	$10{,}3\ (2{,}5) \cdot 10^{-3}$ [15,8 мин, ^{182m}Ta] 21,0 (7) [115 сут, ^{182g}Ta]	6,2 (6)	27,2 (2)
182	115 сут	—	8200 (600)	—	—
W —	—	0,0619	18,5 (5)	—	—
180	0,13	—	3,5 [121 сут, ^{181}W]	—	—
182	26,3	—	20,7 (5)	—	—
183	14,3	—	10,2 (3)	—	—
184	30,7	—	1,8 (2)	—	—
186	28,6	—	37,8 (1,5)	—	—
187	23,9 ч	—	64 (10)		—
Re —	—	0,0950	88 (4)	11,3 (5)	—
185	37,40	—	112 (3)	—	—
187	62,60 $4 \cdot 10^{10}$ лет	—	74 (4)	—	—
188	16,9 ч	—	$< 2{,}0$	—	—
Os —	—	0,0734	15,3 (7)	—	—
184	0,018	—	3000 (150) $< 1 \cdot 10^{-2}$ (n, α)	—	—
186	1,582 $2 \cdot 10^{15}$ лет	—	$< 1 \cdot 10^{-4}$ (n, α)	—	—
187	1,60	—	336 (17) $< 1 \cdot 10^{-4}$ (n, α)	—	344 (12)
188	13,3	—	4,3 (1,0) $< 3 \cdot 10^{-5}$ (n, α)	—	—
189	16,1	—	23 (4) $< 1 \cdot 10^{-5}$ (n, α)	—	—
190	26,4	—	13,0 (3)	—	—
192	41,0	—	2,0 (1)	—	—
193	30,2 ч	—	1540	—	—

Символ и массовое число		Содержание в естественной смеси, %, или (н) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$ [23]	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2	σ_s, 10^{-28} м^2	σ_{tot}, 10^{-28} м^2
Ir		—	0,0782	426 (4)	14 (2)	440 (4)
	191	37,30	—	924 (53)	—	—
	192	74,20 сут	—	1100 (400)	—	—
	193	62,7	—	112,5 (7,5)	—	—
	193*m*	10,6 сут	—	$> 0{,}035$	—	—
Pt		—	0,0661	10,0 (2)	11,2 (1,0)	—
	190	0,013	—	150 (150)	—	—
		$6{,}0 \cdot 10^{11}$ лет		$< 8 \cdot 10^{-3}$ (n, α)		
	192	0,78	—	$< 14{,}0$	—	—
				$< 2 \cdot 10^{-4}$ (n, α)		
	194	32,9	—	1,2 (9)	—	—
				$< 5 \cdot 10^{-6}$ (n, α)		
	195	33,8	—	27 (2)	—	—
				$< 5 \cdot 10^{-6}$ (n, α)		
	196	25,3	—	0,74 (8)	—	—
	198	7,2	—	3,7 (2)	—	—
	199	30,8 мин	—	15 (10)	—	—
Au	197	100	0,0590	98,85 (9)	—	—
	198	2,695 сут	—	25 100 (370)	—	—
	199	3,14 сут	—	30 (15)	—	—
Hg		—	0,0408	375 (5)	—	—
	196	0,15	—	120 (13)	—	—
				[23,8 ч, ^{197m}Hg]		
				3080 (200)		
				[64,1 ч, ^{197g}Hg]		
	198	10,0	—	1,9	—	—
	199	16,8	—	2000 (1000)	—	—
	200	23,1	—	$< 60{,}0$	—	—
	201	13,2	—	$< 60{,}0$	—	—
	202	29,8	—	4,9 (1)	—	—
	204	6,90	—	0,43 (10)	—	—
Tl		—	0,0351	3,4 (5)	9,7 (4)	13,1 (7)
	203	29,5	—	11,0 (5)	—	—
	204	3,77 года	—	21,6 (2,0)	—	—
	205	70,5	—	0,10 (3)	—	—
Pb		—	0,0329	0,170 (2)	11,4 (2)	11,6 (2)
	204	1,42	—	0,661 (70)	—	—
	206	24,1	—	$30{,}5\ (8) \cdot 10^{-3}$	—	—
	207	22,1	—	$709\ (10) \cdot 10^{-3}$	—	—
	208	52,30	—	$487\ (30) \cdot 10^{-6}$	—	—
	210	22.3 года	—	0,5 (5)	—	—
Bi	209	100	0,0280	$33\ (4) \cdot 10^{-3}$	—	—
	210*m*	$3{,}5 \cdot 10^6$ лет	—	$54\ (5) \cdot 10^{-3}$	—	—
Rn	220	55,6 с	—	$< 0{,}2$	—	—
	222	3,8235 сут	—	0,72 (7)	—	—
Ra	223	11,435 сут	—	130 (20)	—	—
				0,7 (3)(n,f)		
	224	3,64 сут	—	12,0 (5)	—	—
	226	1600 лет	—	11,5 (1,5)	—	—
				$< 1 \cdot 10^{-4}$ (n, f)		
	228	5,76 года	—	36 (5)	—	—
				$< 2{,}0$(n, f)		
Ac	227	21,773 года	—	515 (35)	—	—
				$< 2 \cdot 10^{-3}$ (n, f)		

Таблица 41.4. **Сечения деления и захвата, рассеяния и полные сечения для нейтронов с энергией 0,0253 эВ и элементов с атомными номерами 90—100**

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или(и) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$ [23]	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2 [25]	σ_s, 10^{-28} м^2 [24]	σ_f, 10^{-28} м^2 [25]	σ_{tot}, 10^{-28} м^2 [24]
Th 227	18,718 сут	—	—	—	200 (20)	—
228	1,1931 года	—	123 (15)	—	<0,3	—
229	7340 лет	—	54 (6)	—	30,5 (3,0)	84,5 (6,7)
230	$8{,}0 \cdot 10^4$ лет	—	23,2 (6)	13 (4) [26]	$<1{,}2 \cdot 10^{-3}$	—
232	100 $1{,}41 \cdot 10^{10}$ лет	0,0299	7.40 (8)	12,67 (8)	$39\ (4) \cdot 10^{-6}$	20,07 (11)
233	22,3 мин	—	1500 (100)	—	15 (2)	—
234	24,10 сут	—	1,8 (5) [24]	—	<0,01 [24]	—
			—	—	1500 (250) [24]	—
Pa 230	17,7 сут	—				
231	$3{,}28 \cdot 10^4$ лет	0,0402	201 (20)	—	0,012 (6)	211 (4)
232	1,31 сут	—	760 (100)	—	700 (100)	—
233	27,0 сут	—	21 (6) [1,17 мин, ^{234m}Pa] 20 (3) [6,67 ч, ^{234g}Pa]	—	<0,1	55 (3)
234*m*	1,175 мин	—	—	—	<500	—
234	6,75 ч	—	—	—	<5000	—
U 230	20,8 сут	—	—	—	25 (10)	—
231	4,2 сут	—	—	—	400 (300)	—
232	72 года	—	73,1 (1,5)	14,7	75,2 (4,7)	163 (10)
233	$1{,}592 \cdot 10^5$ лет	0,0484	45,5 (7) [27]	8,2 (2,0)	529,1 (1,2) [27]	574,7 (1,0) [27]
234	0,0054 $2{,}45 \cdot 10^5$ лет	—	100,0 (1,5)	12 (4)	<0,65	112 (4)
235	0,720 $7{,}038 \cdot 10^8$ лет	0,0479	98,3 (8) [27]	14,0 (5) [27]	582,6 (1,1) [27]	694,9 (1,1) [27]
236	$2{,}342 \cdot 10^7$ лет	—	5,2 (3)	—	—	—
237	6,75 сут	—	380 (100)	—	<0,35	411 (138) (abs)
238	99,275 $4{,}468 \cdot 10^9$ лет	0,0473	2,71 (2)	8,90 (16)	$5{,}3 \cdot 10^{-6}$	11,60 (16)
239	23,5 мин	—	22 (5)	—	14 (3)	—
Np 234	4,4 сут	—	—	—	900 (300) [24]	—
235	396 сут	—	1600 (200) [24] [22,5 ч, ^{236m}Np] 184 (4) [24] [$1{,}29 \cdot 10^6$ лет, ^{236g}Np]	—	—	—
236	$1{,}29 \cdot 10^6$ лет	—	—	—	2500 (150)	—
237	$2{,}14 \cdot 10^6$ лет	—	169 (3)	—	0,019 (3)	—
238	2,117 сут	—	—	—	2070 (30)	—
239	2,35 сут	—	31 (6) [7,5 мин, ^{240m}Np] 14 (14) [65 мин, ^{240g}Np]	—	<1,0	—
Pu 236	2,85 года	—	—	—	162 (30)	—
237	45,4 сут	—	—	—	2200 (400)	—
238	87,74 года	—	547 (20)	564 (20)	16,5 (5)	588 (20)
239	$2{,}410 \cdot 10^4$ лет	—	269,3 (2,2) [27]	7,7 (5)	741,7 (2,0) [27]	1017,3 (2,9) [27]
240	6570 лет	—	287,0 (1,4)	1,54 (9)	0,05 (5)	291,1 (1,4)
241	14,4 года	—	358,2 (5,1) [27]	11 (1)	1011,1 (6,2) [27]	1369,4 (7,7) [27]
242	$3{,}76 \cdot 10^5$ лет	0,0492	18,5 (4)	8,0 (2)	<0,2	26,5 (5)
243	4,956 ч	—	87 (13)	—	180 (30)	—
244	$8{,}1 \cdot 10^7$ лет	—	1,7 (1) [24]	—	—	—
245	10,5 ч	—	150 (30) [24]	—	—	—
Am 241	433 года	—	0,10 (5) $\cdot 10^{-3}$]22] [13 с, ^{242m2}Am] 83,6 (2,6) [152 года, ^{242m1}Am] 752 (20) [16,01 года, ^{242g}Am] 835,6 (20)	—	3,14 (10)	—
242*m*	152 года	—	1100 (1100)	—	6900 (400)	8000 (800) (abc)

Символ и массовое число	Содержание в естественной смеси, %, или(и) $T_{1/2}$ [22]	Концентрация ядер ρ, 10^{24} см$^{-3}$ [23]	$\sigma_{n,\gamma}$, 10^{-28} м^2 [25]	σ_s, 10^{-28} м^2 [24]	σ_f, 10^{-28} м^2 [25]	σ_{tot}, 10^{-28} м^2 [24]
243	7370 лет	—	79,0 (4,0) 75,2 (1,8) [26 мин, ^{244m}Am] 4,1 (2) [10,1 ч, ^{244g}Am]	—	0,20 (11)	85 (4)
244*m*	26 мин	—	—	—	1600 (300)	—
244	10,1 ч	—	—	—	2300 (300)	—
Cm 242	162,8	—	20 (10)	—	<5,0	—
243	28,5 года	—	131 (10)	—	609 (25)	825 (125)$^{(abs)}$
244	18,11 года	—	13,5 (2,0)	8 (3)	1,0 (2)	23 (3)
245	$8{,}5 \cdot 10^3$ лет	—	350 (30)	—	2030 (60)	2375 (100)
246	$4{,}70 \cdot 10^3$ лет	—	1,3 (3)	—	0,15 (7)	—
247	$1{,}60 \cdot 10^7$ лет	—	59,6	—	80 (7)	—
248	$3{,}5 \cdot 10^5$ лет	—	2,9 (3)	—	0,37 (7)	—
249	65 мин	—	1,6 (8) [24]	—	—	—
Bk 249	321,4 сут	—	1800 (100)	—	—	1300 (300)$^{(abs)}$
250	3,22 ч	—	—	—	960 (150)	—
Cf 249	351,0 ч	—	450 (30)	—	1660 (50)	—
250	13,1 года	—	1750 (250)	—	<350,0	—
251	900 лет	—	2850 (290)	—	4800 (480)	7150 (350)$^{(abs)}$
252	2,64 года	—	20,4 (1,5)	—	32 (4)	—
253	17,8 сут	—	12,0 (2,0)	—	1100 (220)	—
Es 253	20,47 сут	—	155 (20) [39,3 ч, ^{254m}Es] <3,0 [276 сут, ^{254g}Es]	—	—	—
254m	39,3 ч	—	1,3 [39,3 ч, ^{254m}Es]	—	1840 (80)	—
254	276 сут	—	40,0 [38,3 сут, ^{255}Es]	—	2900 (110)	—
255	38,3 сут	—	43 (10)	—	3400 (170) [28]	—
Fm 254	3,24 ч	—	76 (76)	—	—	—
255	20,1 ч	—	26 (3)	—		
256	2,63 ч	—	45 (45)	—		
257	100,5 сут	—	—	—	2950 (160) [24]	6100 (600)$^{(abs)}$

ядра-мишени указано его содержание в естественной смеси, в случае радиоактивного — период полураспада. Для некоторых нуклидов указаны обе величины. В третьей колонке приведены концентрации ядер. В четвертой колонке приведены сечения ядерных реакций $\sigma_{n,\gamma}$, $\sigma_{n,\alpha}$, $\sigma_{n,p}$ и σ_{abs}. Сечения ядерных реакций $\sigma_{n,\alpha}$, $\sigma_{n,p}$ и σ_{abs} отличаются от значений $\sigma_{n,\gamma}$, приводимых в этой колонке, тем, что сопровождаются описанием типа ядерной реакции. Например, запись $70{,}5(1{,}9)^{(abs)}$ или $940(4)^{(n,\alpha)}$ относится к сечениям ядерных реакций σ_{abs} и $\sigma_{n,\alpha}$ соответственно. В некоторых случаях даны сечения образования изомерного состояния, для которого дополнительно в квадратных скобках приводится период полураспада или (и) идентификация состояния: *m* — ядро в метастабильном состоянии, *g* — ядро в осиовном состоянии. В пятой—седьмой колонках даны сечения рассеяния и его составные части $\sigma_{s\,coh}$ и $\sigma_{s\,noncoh}$.

В табл. 41.3 и 41.4 в последней колонке приведены полное сечение взаимодействия и сечение деления соответственно.

41.6. ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТИ ПОЛНЫХ СЕЧЕНИЙ ОТ ЭНЕРГИИ

На рис. 41.4—41.32 представлены энергетические зависимости полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами $^1_1$H, $^3_1$H, $_5$B, $_6$C, $_9$Be, $_{26}$Fe, $_{49}$In, $_{79}$Au, $_{92}$U с водородом в легкой воде и дейтерием в тяжелой воде [29]. Сплошная кривая на графиках соответствует непрерывной зависимости сечений и получена в результате оценки и обработки всей совокупности экспериментальных результатов, имеющихся на момент оценки, и данных, полученных из расчета по теоретическим моделям в тех энергетических областях, где экспериментальных данных нет. Приводимые на рисунках некоторые экспериментальные значения сечений служат лишь для иллюстрации степени отклонения от оцененных значений. Полный перечень экспериментальных данных представлен в [29]. На рис. 41.19 для железа в энергетической области от 0,1 до 3 МэВ дано качественное описание хода сечения ввиду наличия сложной резонансной структуры.

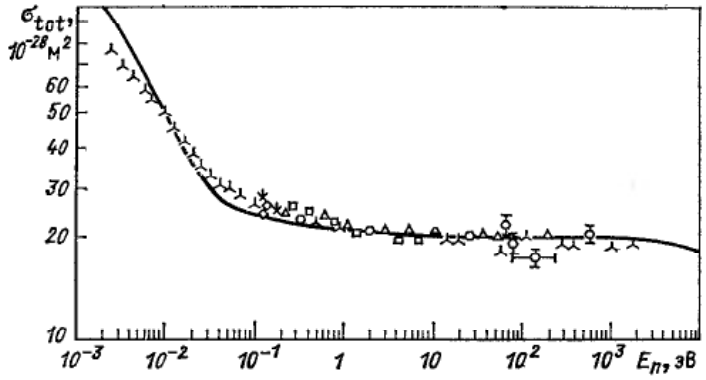


Рис. 41.4. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода от энергии нейтронов ($10^{-3}<E_n<10^4$ эВ) [29]

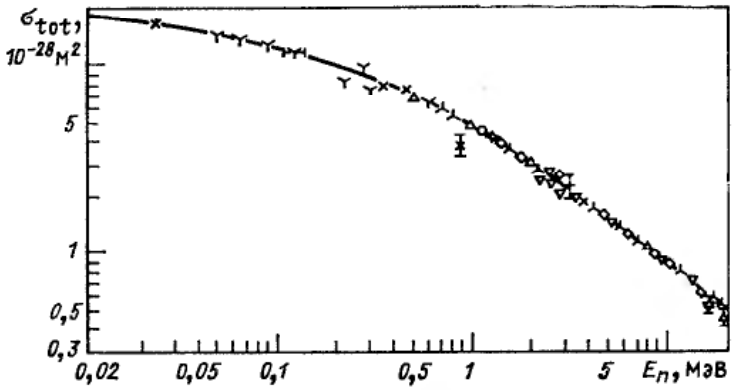


Рис. 41.5. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода от энергии нейтронов ($2\cdot10^{-2}<E_n<20$ МэВ) [29]

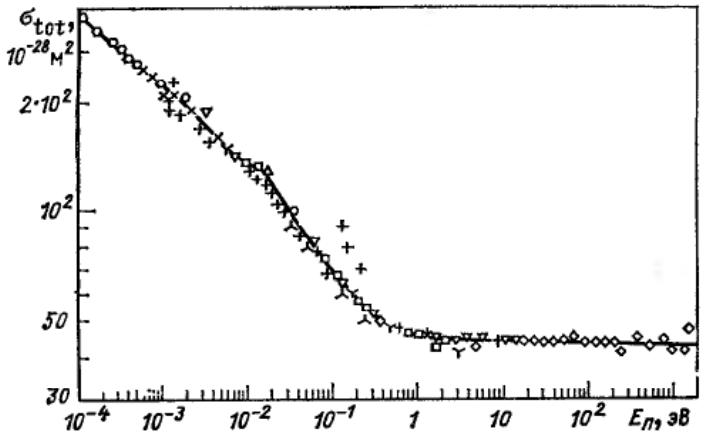


Рис. 41.6. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода в воде от энергии нейтронов ($10^{-4}<E_n<2\cdot10^3$ эВ) [29]

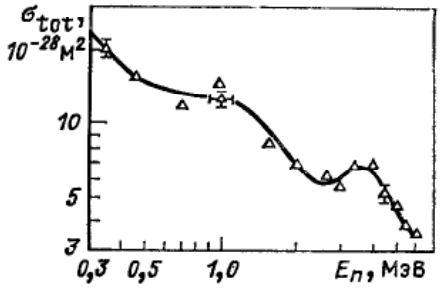


Рис. 41.7. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами водорода в воде от энергии нейтронов ($0,3<E_n<7$ МэВ) [29]

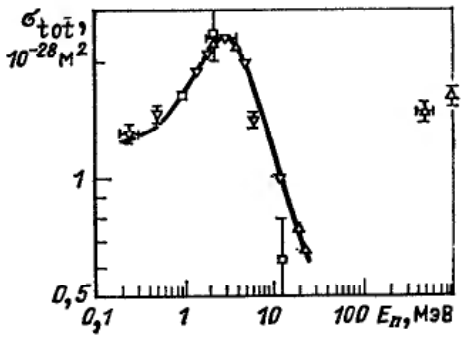


Рис. 41.8. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами трития от энергии нейтронов ($0,2<E_n<12$ МэВ) [29]

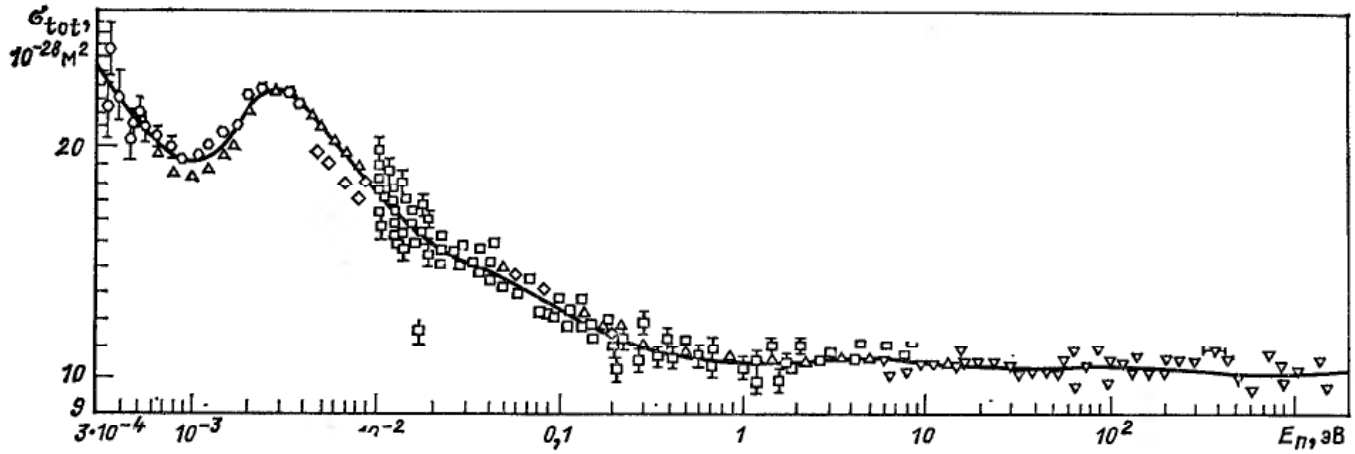


Рис. 41.9. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами дейтерия в тяжелой воде от энергии нейтронов ($3\cdot10^{-4}<E_n<2\cdot10^8$ эВ) [29]

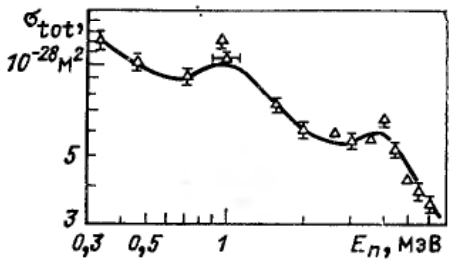


Рис. 41.10. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами дейтерия в тяжелой воде от энергии нейтронов (0,3<E_n<7 МэВ) [29]

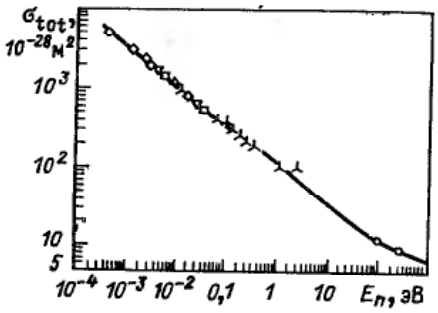


Рис. 41.11. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бора от энергии нейтронов ($4\cdot10^{-4}<E_n<10^8$ эВ) [29]

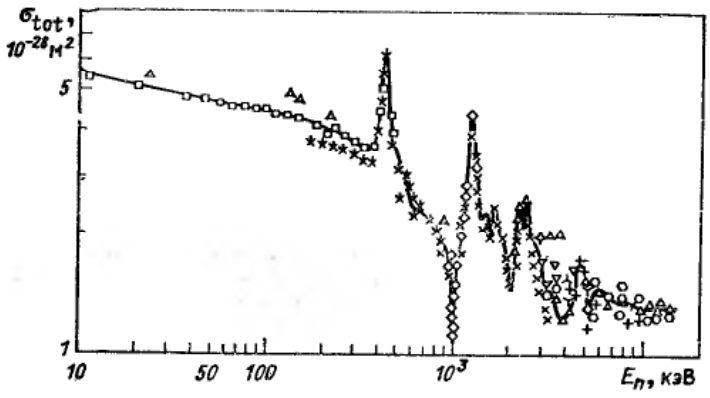


Рис. 41.12. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бора от энергии нейтронов (10<E_n<$<2\cdot10^4$ кэВ) [29]

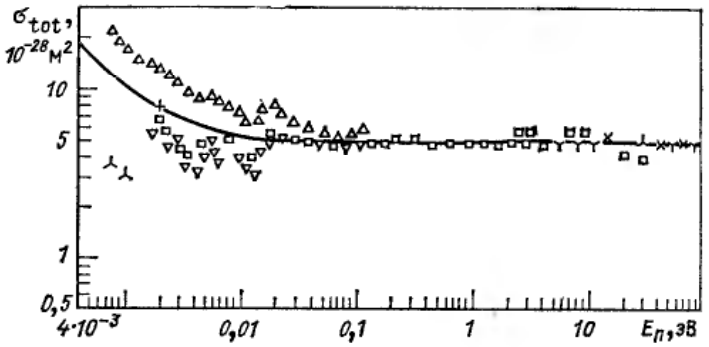


Рис. 41.13. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами углерода от энергии нейтронов ($4\cdot10^{-3}<E_n<100$ эВ) [29]

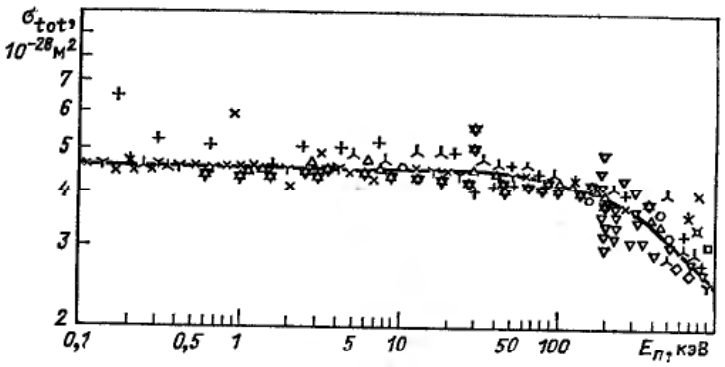


Рис. 41.14. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами углерода от энергии нейтронов (0,1 кэВ<E_n<1МэВ) [29]

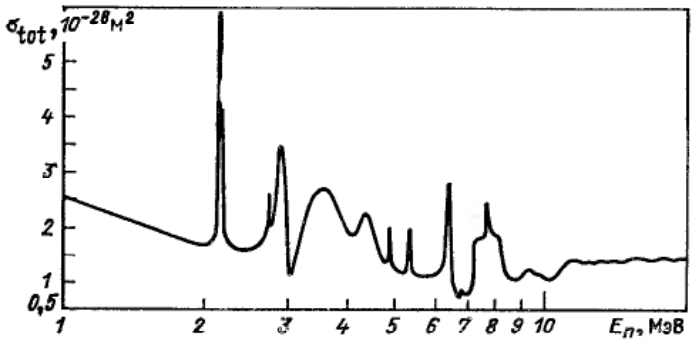


Рис. 41.15. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами углерода от энергии нейтронов ($1 < E_n < 20$ МэВ) [29]

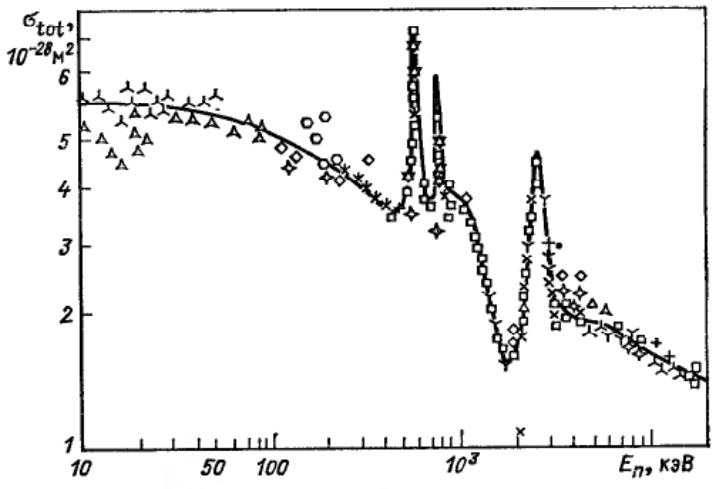


Рис. 41.17. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бериллия от энергии нейтронов (10 кэВ $< E_n <$ 30 МэВ) [29]

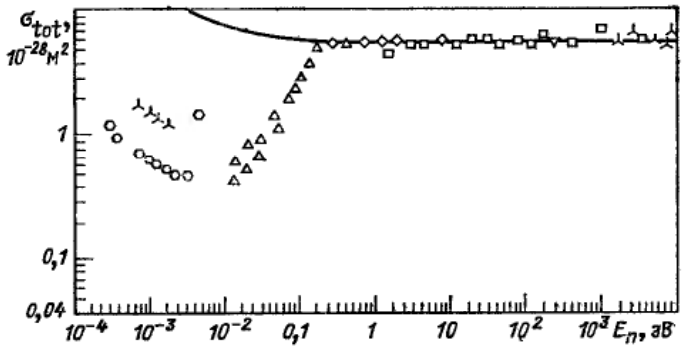


Рис. 41.16. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами бериллия от энергии нейтронов ($10^{-3} < E_n < 10^4$ эВ) [29]

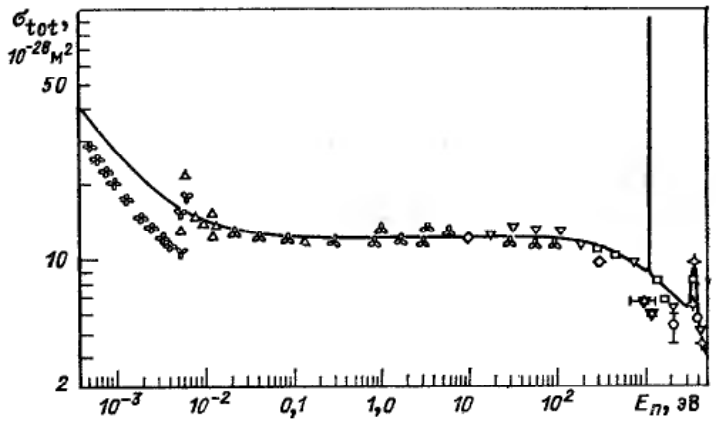


Рис. 41.18. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов ($10^{-3} < E_n < 5 \cdot 10^3$ эВ) [29]

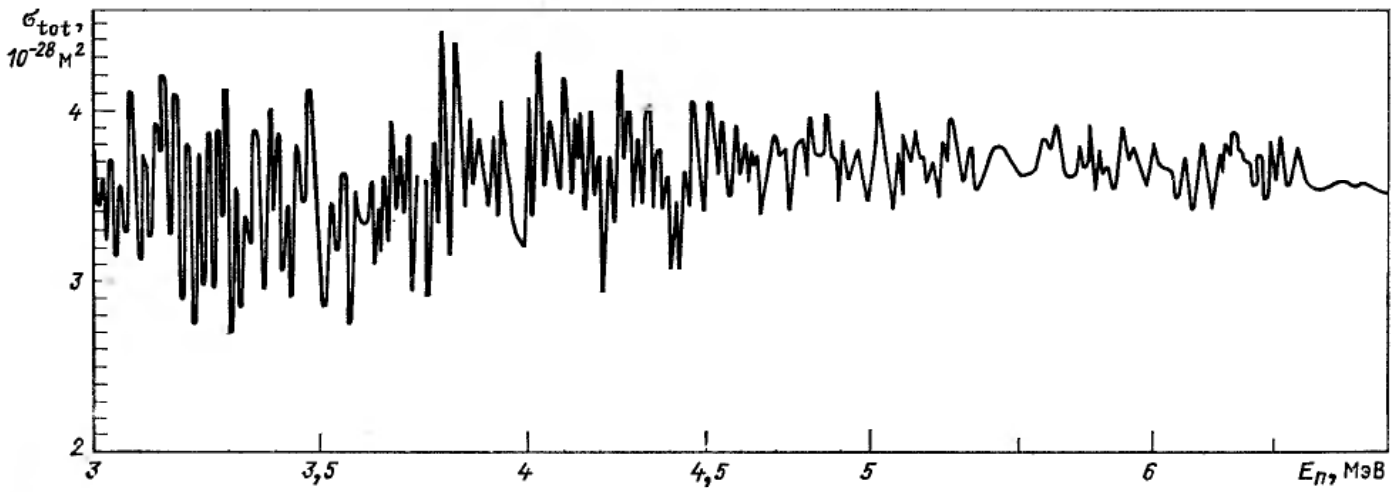


Рис. 41.19. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов ($3 < E_n < 7$ МэВ) [29]

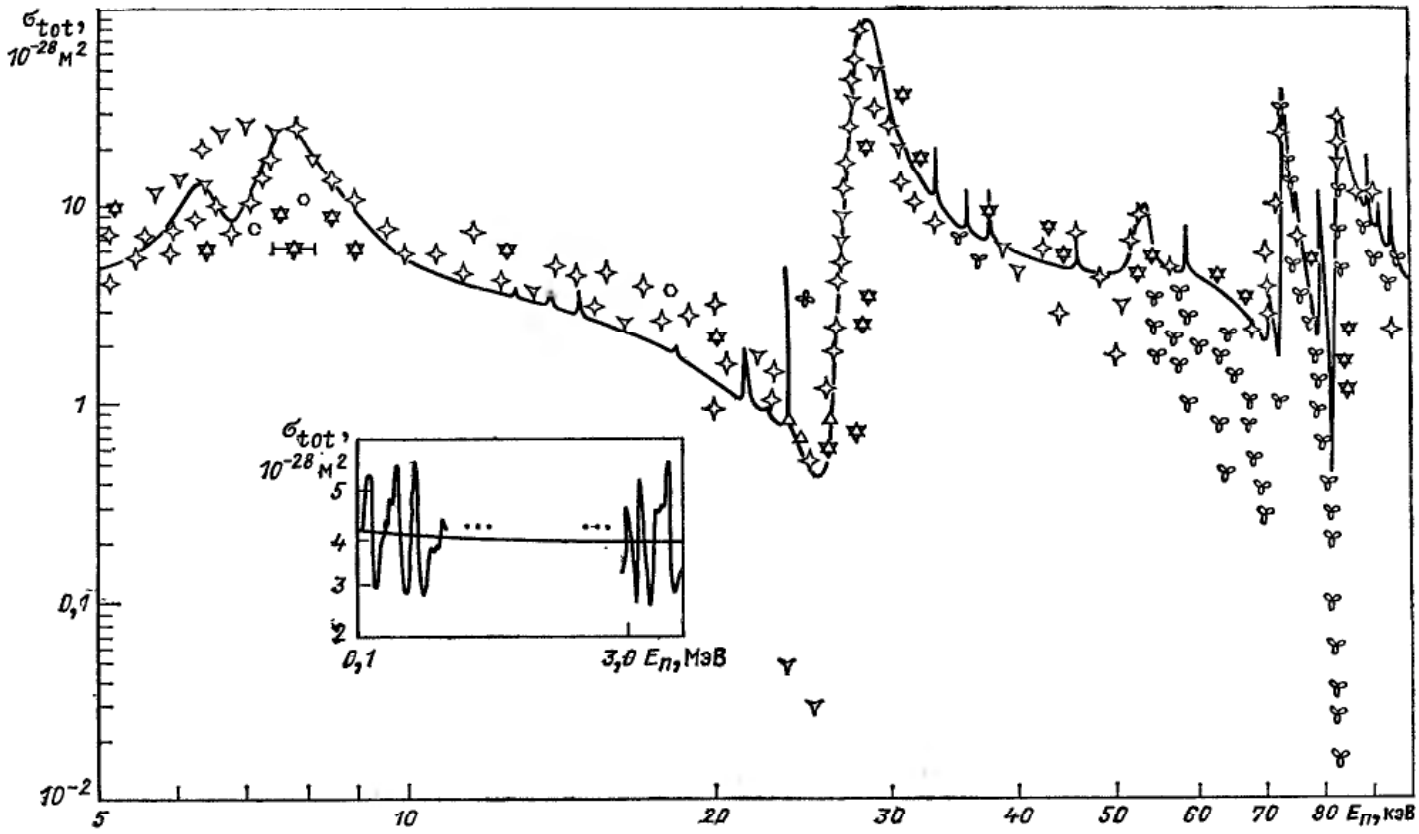


Рис. 41.20. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов (5 кэВ< $<E_n<$3 МэВ) [29]

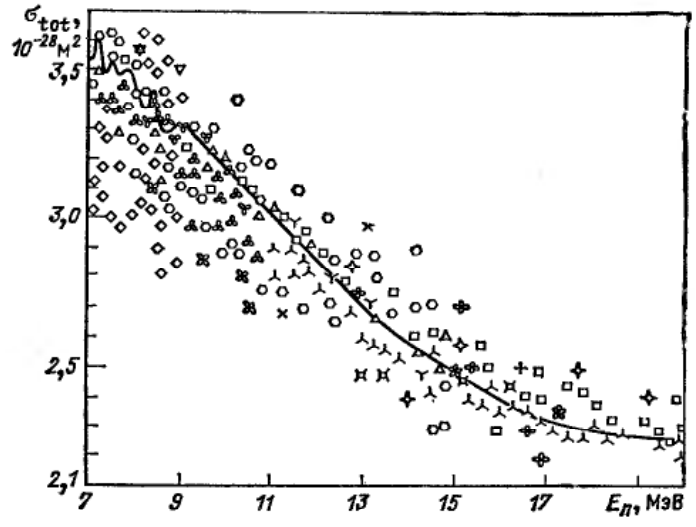


Рис. 41. 21. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами железа от энергии нейтронов (7$<E_n<$20 МэВ) [29]

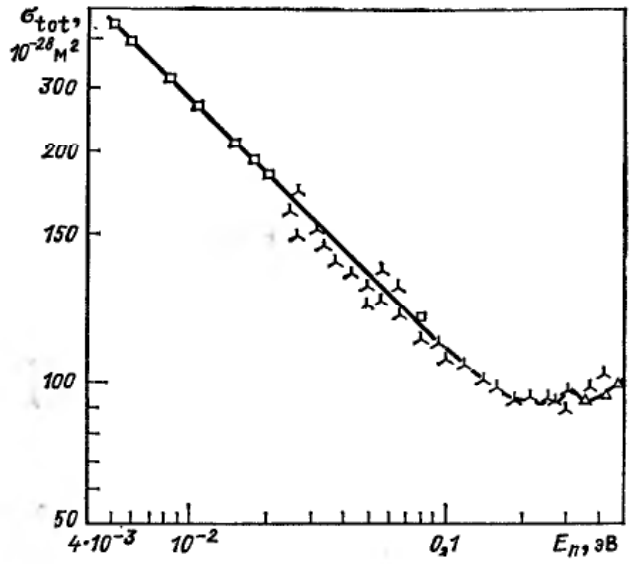


Рис. 41.22. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами индия от энергии нейтронов ($5\cdot10^{-3}<E_n<$0,5 эВ) [29]

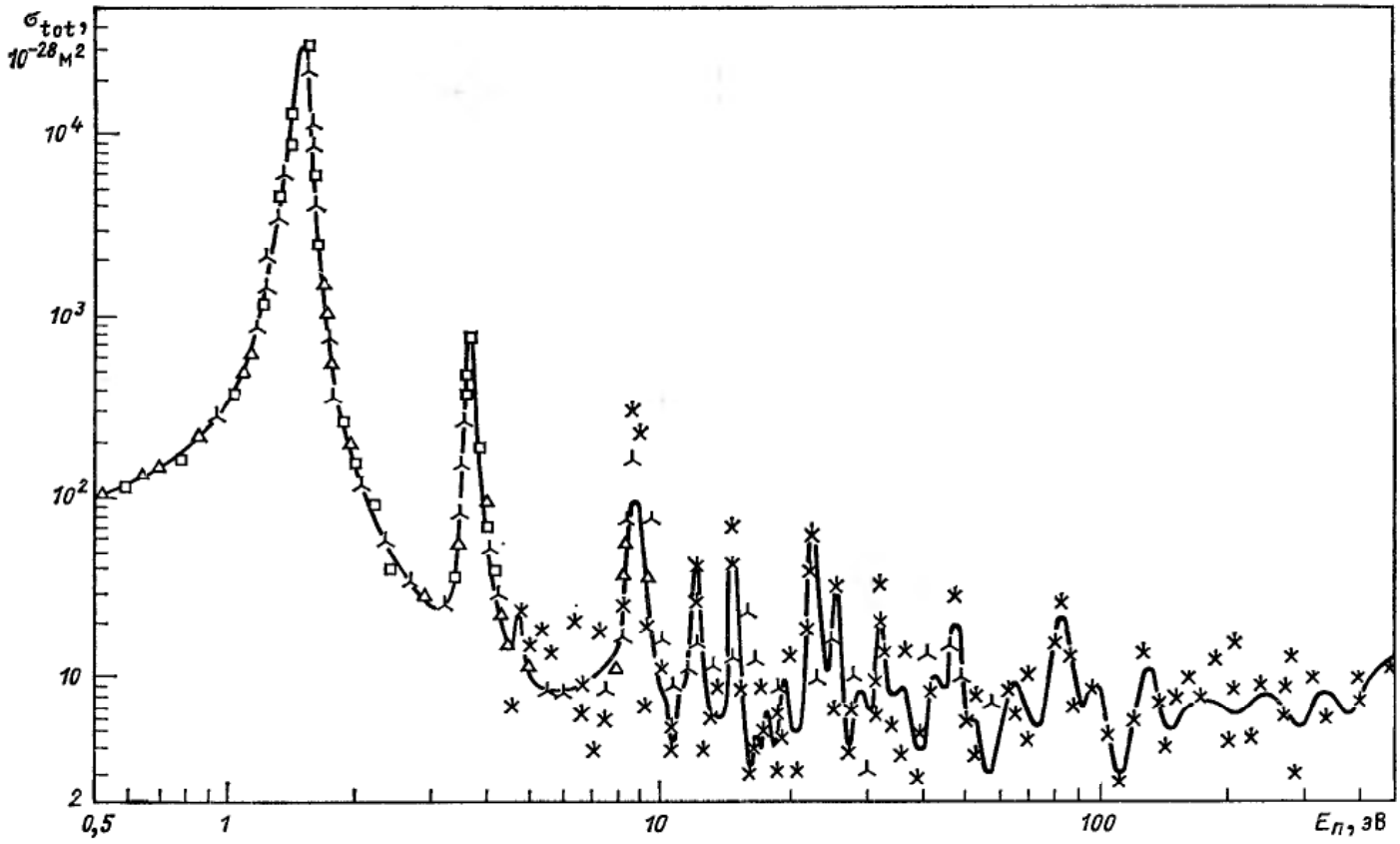


Рис. 41.23. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами индия от энергии нейтронов ($0{,}5 < E_n < 500$ эВ) [29]

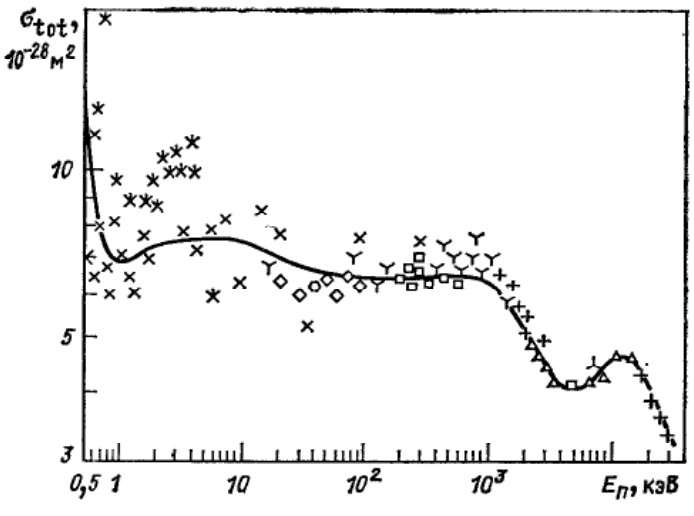


Рис. 41.24. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами индия от энергии нейтронов ($0{,}5$ кэВ $< E_n <$ 30 МэВ) [29]

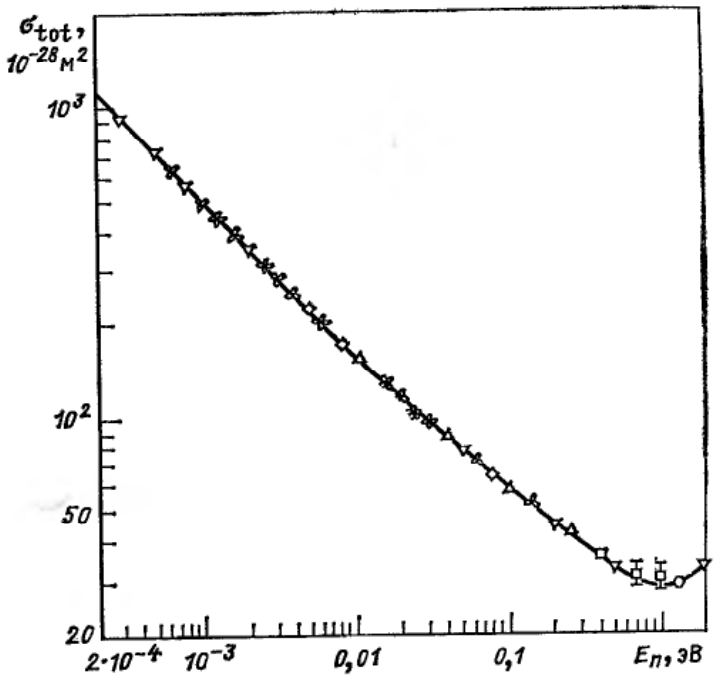


Рис. 41.25. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтроиов с ядрами золота от энергии нейтронов ($10^{-4} < E_n < 2$ эВ [29]

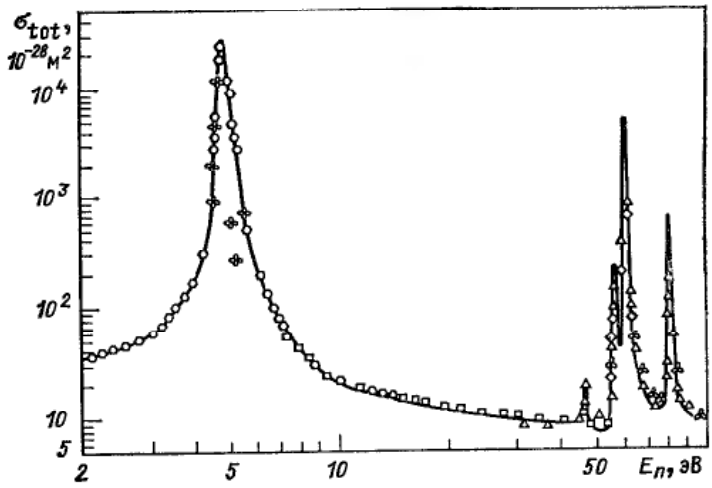


Рис. 41.26. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами золота от энергии нейтронов ($2 < E_n < 100$ эВ) [29]

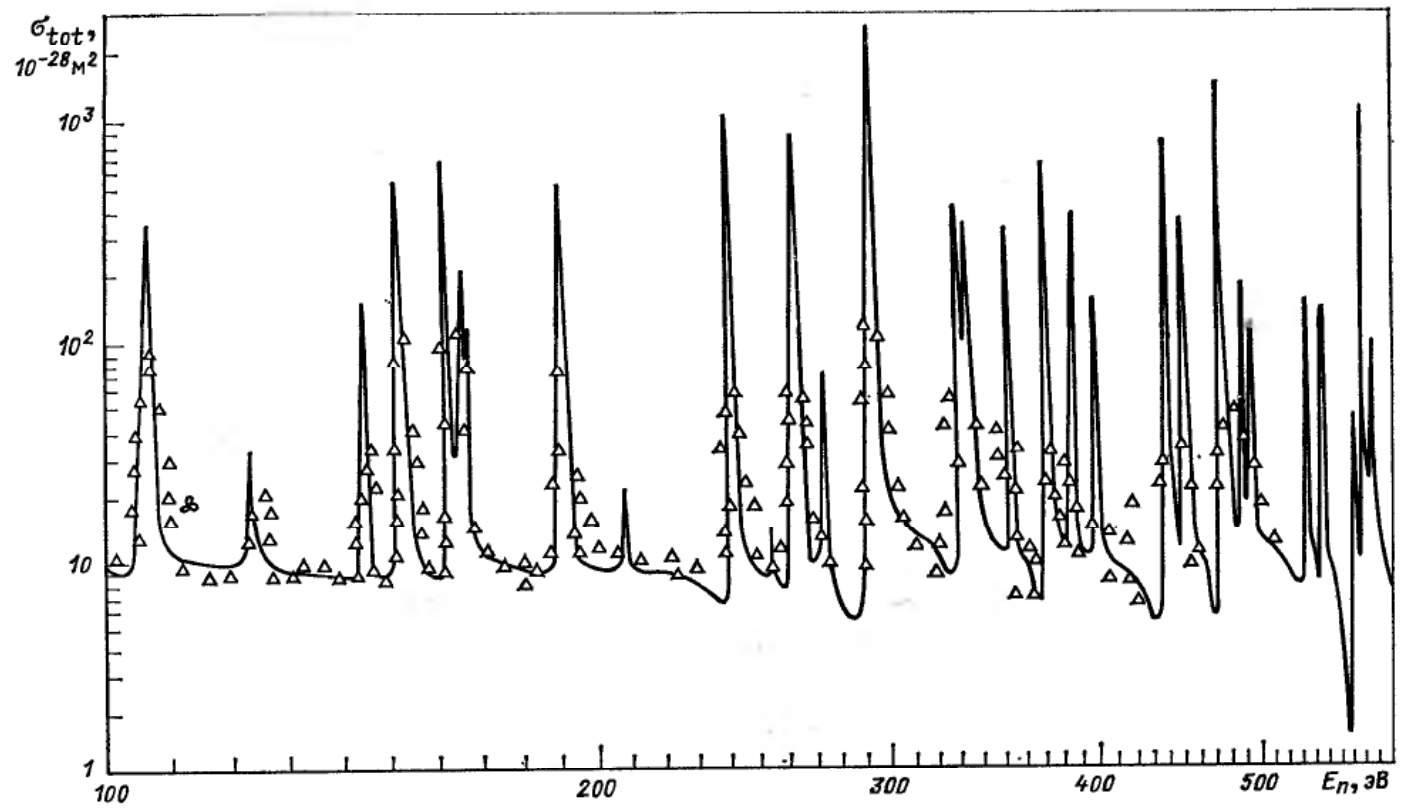


Рис. 41.27. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами золота от энергии нейтронов ($100 < E_n < 600$ эВ) [29]

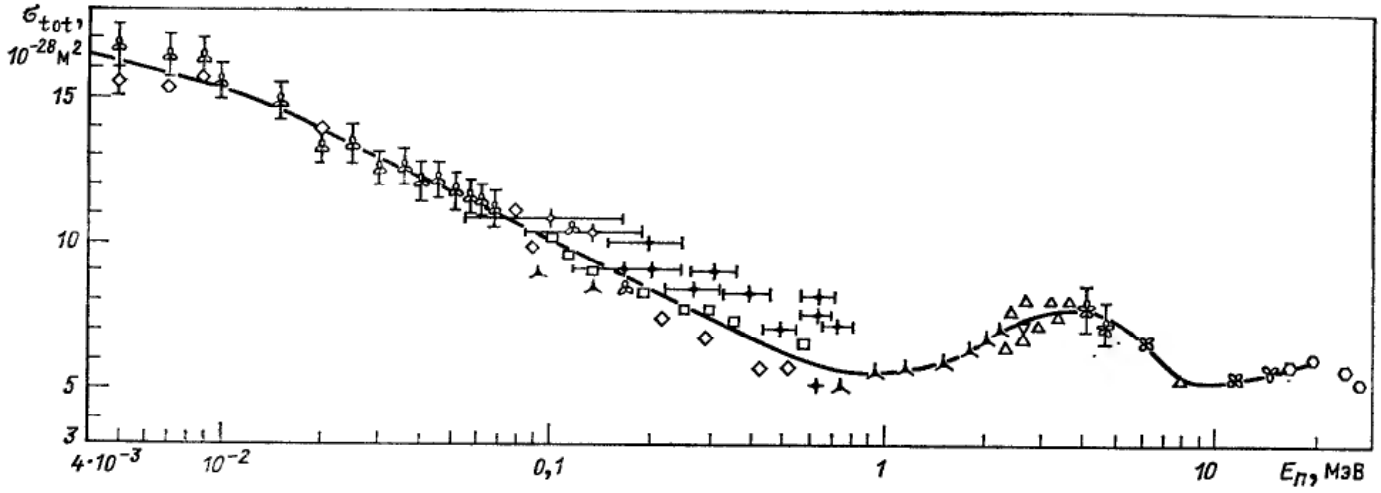


Рис. 41.28. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами золота от энергии нейтронов (4 кэВ $<E_n<$30 МэВ) [29]

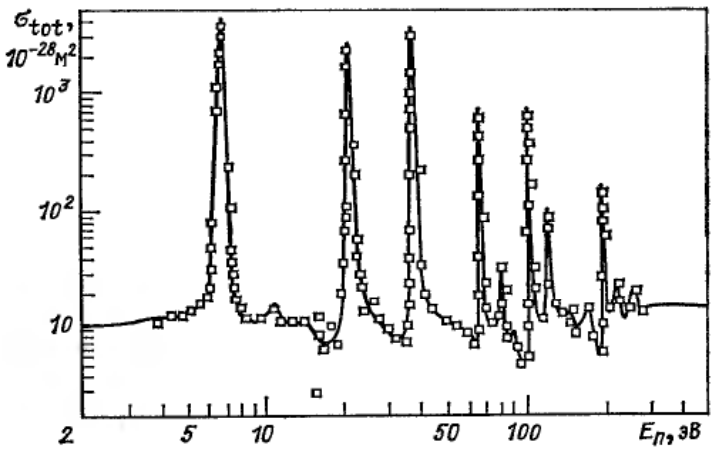


Рис. 41.30. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов (2$<E_n<$500 эВ) [29]

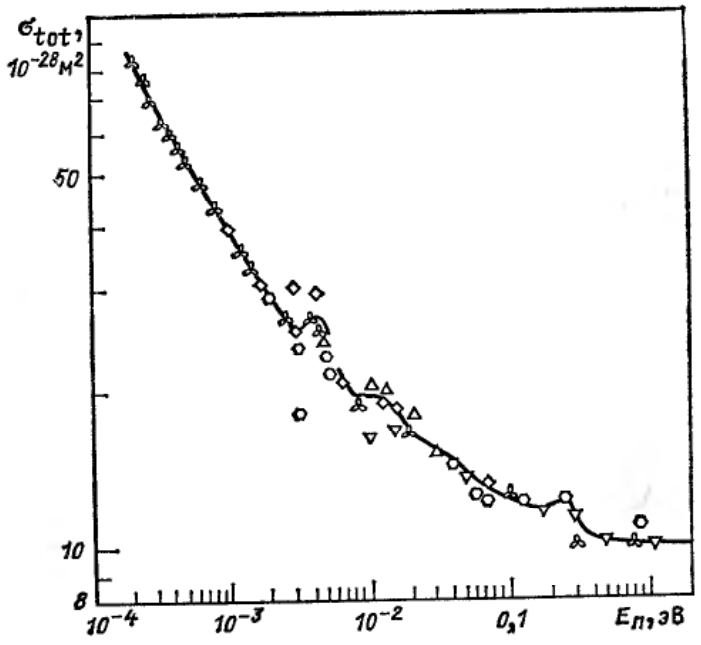


Рис. 41.29. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов ($10^{-4}<E_n<$2 эВ) [29]

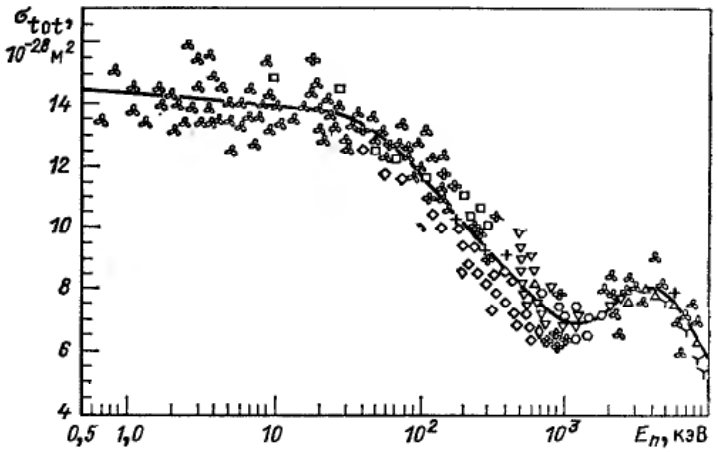


Рис. 41.31. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов (0,5 кэВ$<E_n<$10 МэВ) [29]

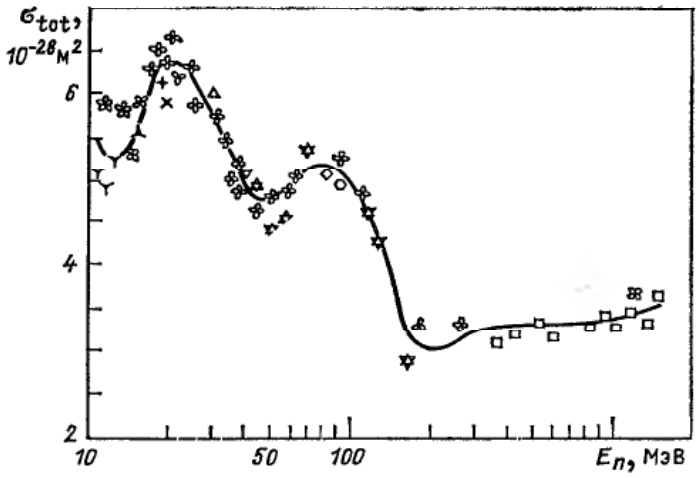


Рис. 41.32. Зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами урана от энергии нейтронов ($10<E_n<10^3$ МэВ) [29]

41.7. РЕЗОНАНСНЫЕ ИНТЕГРАЛЫ

Резонансным интегралом называется величина

$$I_i = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \sigma_i(E)\,\frac{dE}{E},$$

где I_i — в 10^{-28} м^2; E_{min} и E_{max} — нижняя и верхняя границы энергетического спектра, значения которых зависят от условий эксперимента, эВ; i — индекс соответствующего процесса ($i=\gamma$ означает радиационный захват, $i=f$ — деление и т. д.); $\sigma_i(E)$ — энергетическая зависимость сечения i-го процесса. Вклад высокоэнергетической области $\sigma_i(E)$ в резонансный интеграл, как правило, незначителен, поэтому полагают $E_{max}\longrightarrow\infty$.

Когда известно аналитическое выражение энергетической зависимости сечения ядерной реакции, значение резонансного интеграла может быть вычислено. К основным методам определения резонансных интегралов относятся измерения в поле нейтронов, сформированном из теплового максвелловского спектра с соответствующей температурой T, К, и эпитеплового $1/E$-спектра с нижней границей μkT, где μ зависит от типа ядерного реактора; k — постоянная Больцмана, эВ/К. Для тяжеловодного реактора $\mu\approx5$, для графитового $\mu\approx3$, так что при $T=293{,}6$ К μkT равно 0,126 и 0,076 эВ соответственно.

Величина

$$I_1' = \int_{\mu kT}^{\infty} \left[\sigma(E) - g(T)\,\sigma_0\sqrt{\frac{E_0}{E}}\right]\frac{dE}{E}$$

называется избыточным резонансным интегралом, где $g(T)$ — фактор Весткотта или g-фактор, определяющий отклонение зависимости сечения $\sigma(E)$ от закона $1/\sqrt{E}$; $E_0=0{,}0253$ эВ; σ_0 — значение сечения при E_0. С учетом того, что граница кадмиевого среза E_{Cd}, эВ, выше значения μkT, интегрирование выполняется по двум энергетическим областям:

$$I_1' = \int_{\mu kT}^{E_{Cd}} \left[\sigma(E) - g(T)\sigma_0\sqrt{\frac{E_0}{E}}\right]\frac{dE}{E} +$$

$$+\int_{E_{Cd}}^{\infty}\left[\sigma(E) - g(T)\,\sigma_0\sqrt{\frac{E_0}{E}}\right]\frac{dE}{E} =$$

$$=[\Delta I - \Delta I(1/v)] + [I - I(1/v)] = \Delta I' + I',$$

где I' — эпикадмиевый резонансный интеграл без части, зависящей от $1/v$; $\Delta I'$ — часть, обрезаемая кадмиевым фильтром, которая зависит от температуры нейтронов и мала для тепловых энергий (табл. 41.5). Вклад члена $\Delta I'$ следует учитывать для тех ядер, у которых резонансные пики расположены ниже E_{Cd} (^{133}Cd, ^{151}Eu, ^{176}Lu, ^{182}Ta, ^{191}Ir, ^{231}Pa, ^{239}Pu и др.).

Данные по эпикадмиевым резонансным интегралам относятся к I' или I, которые включают часть, зависящую от $1/v$. Эта часть определяется из выражения

$$I(1/v) = I - I' = \int_{E_{Cd}}^{\infty} g(T)\sigma_0\sqrt{\frac{E_0}{E}}\,\frac{dE}{E} \approx$$

$$\approx 2g(T)\,\sigma_0\sqrt{\frac{E_0}{E_{Cd}}}.$$

Таблица 41.5. **Обозначения резонансных интегралов**

Обозначение	Название	Пределы интегрирования	Примечания
I'	Эпикадмиевый избыточный резонансный интеграл	$E_{Cd}-\infty$	Метод кадмиевого фильтра
$I(1/v)$	Часть резонансного интеграла, зависящая от $1/v$	$E_{Cd}-\infty$	—
I	Эпикадмиевый резонансный интеграл, включающий часть, которая зависит от $1/v$	$E_{Cd}-\infty$	$I = I' + I(1/v)$
I_1'	Избыточный резонансный интеграл	$\mu kT-\infty$	Метод без кадмиевого фильтра
$\Delta I'$	Избыточный резонансный интеграл в области $E<E_{Cd}$	$\mu kT-E_{Cd}$	$\Delta I' = I_1' - I'$

Таблица 41.6. **Резонансные интегралы [28]**

Символ	Массовое число	Период полураспада продукта реакции	I_γ, 10^{-28} м²	Стандарт	E_{Cd}, эВ или I'
H	1	—	0,1489	—	0,5
	2	12,346 года	$6,298 \cdot 10^{-4}$	—	0,5
He	3	—	2390 (10)	—	0,5
Li	6	—	28	Au (1558)	0,4
	7	—	425,4	—	0,5
		844 мс	0,01756	—	0,5
Be	9	$1,6 \cdot 10^6$ лет	$4(1) \cdot 10^{-3}$	—	0,5
B		—	341 (2)	—	0,5
	10	—	1722 (5)	—	0,5
	11	0,0203 с	0,0757	—	0,5
C		—	$1,5\,(2) \cdot 10^{-3}$	—	0,5
	12	—	$1,5\,(2) \cdot 10^{-3}$	—	0,5
N		—	0,90 (5)	—	0,5
	14	—	0,90 (5)	—	0,5
O		—	$0,31\,(4) \cdot 10^{-3}$	—	0,5
	16	—	$0,27\,(3) \cdot 10^{-3}$	—	0,5
F	19	11,0 с	$17,6\,(3,0) \cdot 10^{-3}$	—	0,5
Na	23	0,02 с, ^{24m}Na	—	—	—
		15,03 ч, ^{24g}Na	—	—	—
		$^{24(m+g)}$Na	0,360 (93)	Au (1558)	0,5
Mg		—	0,076 (20)	Au (1556)	$I' = 0,045(2)$
	24	—	0,030 (4)	—	0,5
Al	27	2,246 мин	0,175 (5)	Au (1551)	0,55
Si		—	0,5	Au (1558)	0,4
	28	—	0,078 (5)	—	0,5
P	31	14,3 сут	0,08 (2)	—	0,5
S		—	0,6	Au (1558)	0,4
	32	—	1,672	—	0,5
Cl		—	12,8 (1,7)	Li (32,2)	0,5
	35	$3,5 \cdot 10^5$ лет	17 (2)	—	0,5
Ar		—	0,42 (5)	—	0,5
	40	1,83 ч	0,41 (3)	—	0,5
K		—	1,0 (1)	—	0,5
	39	—	0,9 (1)	—	0,5
Ca		—	0,20 (2)	—	0,5
		$1,3 \cdot 10^5$ лет	0,18 (3)	—	—
	40	18,7 с, ^{46m}Sc	—	—	—
Sc	45	84,0 сут, ^{46g}So	—	—	0,5
	51	$^{46(m+g)}$Sc	12 (1)	Au (1560)	0,5
Ti		—	3,8 (9)	Li (32,2)	0,5
	48	—	3,7 (3)	—	0,5
V		—	2,7 (1)	—	0,5
	51	3,75 мин	3,53 (1,40)	Au (1558)	0,5
Cr		—	1,7 (2)	—	0,5
	50	27,7 сут	12,5 (3,24)	Au (1558)	0,5
	52	—	0,60 (5)	—	0,5
Mn	55	2,58 ч	15,6 (5)	Au (1560)	0,5
Fe		—	1,4 (2)	—	0,5
	56	—	1,4 (2)	—	0,5
Co	59	10,5 мин, ^{60m}Co	39,7 (4,3)	Au (1551)	0,55
		5,272 года ^{60g}Co	31,4 (4,8)	Au (1551)	0,55
		$^{60(m+g)}$Co	71,1 (1,8)	Au (1551)	0,55
Ni		—	2,2 (2)	—	0,5
	58	$7,5 \cdot 10^4$ лет	2,2 (2)	—	0,5
Cu		—	3,2 (3)	—	0,5
	63	12,7 ч	5,3 (1)	Au (1560)	0,5
Zn		—	2,3 (3)	—	0,5
	64	244 сут	1,73 (8)	Au (1560)	0,5
Ga		—	18,7 (1,5)	—	0,5
	69	21,1 мин	15,6 (1,5)	—	0,5
Ge		—	6,1 (1,0)	—	0,5
As	75	26,4 ч	75 (3)	Au (1560)	0,5

Символ и массовое число	Период полураспада продукта реакции	I_γ, 10^{-28} м²	Стандарт	E_{Cd}, эВ или I'
Se	—	9,6 (1,2)	32,2	0,5
80	57,3 мин, ^{81m}Se	0,50 (2)	Au, Co	0,55
	18 мин, ^{81g}Se	—	—	—
	$^{81(m+g)}$Se	1,7 (2)	—	0,5
Br	—	90 (6)	—	0,5
79	4,42 ч, ^{80m}Br	34,5 (4,0)	—	0,5
	18 мин, ^{80g}Br	92,0 (10,0)	—	0,5
	$^{80(m+g)}$Br	132,5 (10)	—	0,5
Kr	—	53 (7)	—	0,5
84	4,48 ч, ^{85m}Kr	6,03	—	$I' = 6$
	10,76 года, ^{85g}Kr	2,01	—	$I^1 = 2$
	$^{85(m+g)}$Kr	2,7 (7)	—	0,5
Rb	—	6,0 (5)	—	0,5
85	1,02 мин, ^{86m}Rb	1,16 (3)	Au, Co	0,55
	18,7 сут, ^{86g}Rb	—	—	—
	$^{86(m+g)}$Rb	7,5 (5)	—	0,5
Sr	—	11 (2)	—	0,5
88	50,5 сут	0,05 (2)	—	0,5
Y 89	3,19 ч, ^{90m}Y	0,88 (8)	Au, Co	0,55
	64,1 ч, ^{90g}Y	—	—	—
	$^{90(m+g)}$Y	1,0 (2)	—	0,5
Zr	—	1,10 (15)	—	0,5
90	—	0,20 (3)	—	0,5
Nb 93	6,2 мин, ^{94m}Nb	6,56 (1,96)	Au (1558)	0,5
	$2{,}0 \cdot 10^4$ лет, ^{94g}Nb	—	—	—
	$^{94(m+g)}$Nb	8,5 (5)	—	0,5
Mo	—	22 (2)	—	0,5
Tc 99	15,8 с	340 (20)	—	0,5
Ru	—	42 (4)	—	0,5
102	39,35 сут	4,1 (4)	—	0,5
Rh 103	4,4 мин, ^{104m}Rh	89 (7)	Au (1549)	$I' = 78$ (7)
	42 с, ^{104g}Rh	1111 (74)	Au (1549)	$I' = 1054$ (74)
	$^{104(m+g)}$Rh	1100 (50)	—	0,5
Pd	—	90 (5)	—	0,5
106	21,3 с, ^{107m}Pd	—	—	—
	$6{,}5 \cdot 10^6$ лет, ^{107g}Pd	—	—	—
	$^{107(m+g)}$Pd	5,73 (57)	—	0,5
Ag	—	747 (20)	—	0,5
107	127 лет, ^{108m}Ag	1,26 (19)	Co (75)	$I' = 3{,}0$ (5)
	2,41 мин, ^{108g}Ag	—	—	—
	$^{108(m+g)}$Ag	95 (4)	Au (1558)	$I' = 79$ (4)
109	250,4 сут, ^{110m}Ag	71,7 (3,6)	Co (75)	$I' = 15{,}5$ (8)
	24,6 с, ^{110g}Ag	1112 (68)	Au, Co	0,55
	$^{110(m+g)}$Ag	1450 (40)	—	0,5
Cd	—	102 (2)	—	0,5
In	—	3200 (50)	—	0,5
115	2,2 с, ^{116m2}In	—	—	—
	54 мин, ^{116m1}In	—	—	—
	14 с, ^{116g}In	690 (45)	Au	1,3
	$^{116(m1+m2)}$In	2114 (23)	Au, Co	0,55
	$^{116(g+m1+m2)}$In	3300 (850)	—	—
Sn	—	8,5 (2,0)	—	0,5
Sb	—	175 (10)	—	0,5
121	4,2 мин, ^{122m}Sb	—	—	—
	2,7 сут, ^{122g}Sb	—	—	—
	$^{122(m+g)}$Sb	230 (10)	Au (1560)	0,5
Te	—	54 (3)	—	0,5
I 125	—	13 730 (2000)	—	0,5
127	24,99 мин	150 (3)	Au (1560)	0,5

Символ и массовое число		Период полураспада продукта реакции	I_γ, 10^{-28} м²	Стандарт	E_{Cd}, эВ или I
Xe	129	—	250 (25)	—	0,5
Cs	133	2,89 ч, ^{134m}Cs	29, 2(6,2)	Au (1550)	0,55
		2,05 года, ^{134g}Cs	359 (90)	Au (1550)	0,55
		$^{134(m+g)}$Cs	415 (15)	—	0,5
Ba		—	7,5 (1,0)	—	0,5
	138	83,3 мин	0,4 (2)	Au (1560)	0,5
La		—	19 (1)	Au (1558)	0,5
	139	40,22 ч	12,5 (4)	Au (1560)	0,5
Ce		—	3,0 (8)	—	0,5
	140	32,5 сут	0,43 (2)	Au (1550)	0,55
Pr	141	19,2 ч	14,1 (2)	—	0,5
Nd		—	45 (5)	—	0,5
Pm	147	41,3 сут, ^{148m}Pm	1026 (280)	—	0,5
		5,37 сут, ^{148g}Pm	1274 (66)	—	0,5
		$^{148(m+g)}$Pm	3220	Au (1558)	—
Sm		—	1400 (20)	—	0,5
Eu		—	6320 (869)	Au (1551)	0,2
	153	8,5 года	3414 (197)	Au (1551)	0,55
Gd		—	390 (10)	—	0,5
Tb	159	72,1 сут	400 (24)	Au (1558)	$I' = 390$ (24)
Dy		—	1600 (100)	—	0,5
Ho	165	1200 лет, ^{166m}Ho	—	—	—
		27,2 ч, ^{166g}Ho	660 (30)	Au (1550)	0,5
		$^{166(m+g)}$Ho	700 (20)	—	0,5
Er		—	740 (10)	—	0,5
Tm		0,004 мс, ^{m}Tm	—	—	—
		130 сут, ^{g}Tm	—	—	—
		$^{(m+g)}$Tm	1548 (56)	Au (1550)	0,55
Yb		—	182 (10)	—	0,5
Lu		—	900 (50)	—	0,5
	175	3,69 ч, ^{176m}Lu	523 (57)	Au (1551)	0,55
Hf		—	2000 (100)	—	0,5
Ta	—	—	720 (25)	Au (1575)	0,5
	181	16,5 мин, ^{182m}Ta	0,415 (110)	Au (1551)	0,55
		115,1 сут, ^{182g}Ta	717 (58)	Au (1551)	0,55
		$^{182(m+g)}$Ta	717 (58)	Au (1551)	0,55
W		—	352 (30)	—	0,5
Os		—	209	Au (1558)	0,5
Ir		—	2250 (200)	—	0,5
	193	171 сут, ^{194m}Ir	—	—	—
		19 ч, ^{194g}Ir	1370 (150)	—	0,5
		$^{194(m+g)}$Ir	1386 (110)	Au (1550)	0,55
Pt		—	140 (6)	—	0,5
Au	197	2,7 сут	1560 (40)	—	0,5
Hg		—	73 (10)	—	0,5
Tl		—	12 (1)	—	0,5
	205	4,19 мин, ^{206m}Tl	0,7 (2)	—	0,5
Pb		—	0,16 (4)	—	0,5
	207	—	0,4 (2)	—	0,5
Bi	209	$3{,}5 \cdot 10^6$ лет, ^{210m}Bi	—	—	—
		5,01 сут, ^{210g}Bi	—	—	—
		$^{210(m+g)}$Bi	0,19 (3)	—	0,5
Ra	226	41,2 мин	222 (15)	—	0,5
Ac	227	6,13 ч	1017 (103)	Co (70)	0,5

Таблица 41.7. **Резонансные интегралы делящихся элементов [25]**

Символ и массовое число	Период полураспада	g_γ (300 K)	I_γ, 10^{-28} м²	g_f (300 K)	I_f, 10^{-28} м²
Th 228	1,913 года	—	1000	—	—
229	7300 лет	1,043	1000 (180)	1,025	464 (70)
230	80 000 лет	1,013	1010 (30)	—	—
232	$1{,}4 \cdot 10^{10}$ лет	0,995	85 (3)	—	0,619
233	22,3 мес	—	400 (100)	—	—
Pa 231	32 760 лет	1,020	470 (100)	—	—
233	27,0 сут	0,980	895 (30)	—	—
U 232	72 года	0,973	280 (15)	0,976	350 (100)
233	159 200 лет	1,022	140 (6)	0,998	764 (13)
234	244 600 лет	0,989	645 (70)	—	—
235	$7{,}038 \cdot 10^8$ лет	0,981	144 (6)	0,980	275 (5)
236	$2{,}342 \cdot 10^7$ лет	1,002	365 (20)	—	—
237	6,75 сут	—	1200 (200)	—	—
238	$4{,}468 \cdot 10^9$ лет	1,002	278 (5)	—	2,03
Np 237	$2{,}14 \cdot 10^6$ лет	0,952	660 (50)	—	6,9
238	2,117 сут	—	—	—	880 (70)
Pu 236	2,85 года	—	197 [28]	—	960 [28]
238	87,74 года	0,956	162 (15)	0,956	23 (5)
239	24 110 лет	1,131	190 (20)	1,065	310 (10)
240	6553 года	1,028	8260 (250)	—	—
241	14,7 года	1,04	162 (8)	1,046	570 (17)
242	$3{,}76 \cdot 10^5$ лет	1,010	1280 (50)	—	4,7 (4,7)
243	4,956 ч	—	265 (60)	—	540 (140)
Am 241	432,6 года	0,994	1400 (90)	1,014	22 (2)
241	432,6 года	—	1190 (80), (*g*)	—	—
241	432,6 года	—	220 (15), (*m*)	—	—
242*g*	16,01 ч	—	300	—	—
242*m*	141 год	1,104	230 (100)	1,100	1900 (300)
243	7380 лет	1,013	2050 (100)	—	10 (6)
243	7380 лет	—	110 (10), (*g*)	—	—
243	7330 лет	—	1940 (100), (*m*)	—	—
Cm 242	162,8 сут	0,927	150 (40)	—	—
243	28,5 года	—	215 (20)	—	1550 (200)
244	18,11 года	1,001	625 (50)	0,998	19 (2)
245	8500 лет	0,936	104 (8)	0,942	790 (40)
246	4700 лет	1,005	117 (8)	1,006	12,2
247	$1{,}6 \cdot 10^7$ лет	1,002	500 (75)	0,995	750 (100)
248	$3{,}5 \cdot 10^5$ лет	1,002	265 (25)	—	14 (2)
Bk 249	321,4 сут	—	1400 (700)	—	—
Cf 249	351 год	—	660 (120)	—	1900 (100)
250	13,1 года	—	8300 (4000)	—	—
251	900 лет	—	1590 (70)	—	5400 (800)
252	2,84 года	—	43 (4)	—	110 (20)
253	17,8 сут	—	12 (2)	—	2000 (500)
Es 253	20,47 сут	—	7300 (400)	—	—
253*g*	20,47 сут	—	4300 (220)	—	—
253*m*	20,47 сут	—	3000 (180)	—	—
254	276 сут	—	—	—	2200 (100)
Fm 257	100,5 сут	—	5000 [28]	—	—

В табл. 41.6 и 41.7 приведены значения резонансных интегралов; для некоторых элементов в пятой колонке даны дополнительные сведения о значении эпикадмиевого избыточного резонансного интеграла I'. Кроме того, для большинства элементов указаны эталонный образец и значение его резонансного интеграла, которые были использованы при обработке экспериментальных данных. Рекомендуются также данные [6, 21, 44].

41.8. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ $(n, 2n)$

Реакция $(n, 2n)$ относится к числу пороговых, и когда энергия нейтрона превышает на несколько мегаэлектрон-вольт значение пороговой энергии, эта реакция, как правило, протекает с большой вероятностью. Порог реакции $(n, 2n)$ равен приблизительно энергии связи нейтрона в ядре-мишени, поэтому она протекает только при взаимодействии с нейтронами энергией выше 8 МэВ. Исключение составляет реакция на бериллии, для которой порог равен примерно 2 МэВ.

Значения сечений ядерной реакции $(n, 2n)$ для различных нуклидов, усредненные по спектру нейтронов деления ^{235}U, и энергетические зависимости сечения ядерной реакции $(n, 2n)$ для ^{9}Be, ^{56}Fe, ^{127}In, ^{208}Pb, ^{232}Th, ^{238}U приведены в табл. 41.8 и на рис. 41.33—41.38.

Для оценки сечения ядерной реакции $(n, 2n)$ в области энергий нейтронов приблизительно от 14 до 15 МэВ может быть использована следующая формула:

$$\sigma_{(n,\,2n)} = \begin{cases} (1000+7{,}5A)\left(7{,}8\,\dfrac{N-Z}{A} - 0{,}234\right), \\ \qquad \text{если } \dfrac{N-Z}{A} \leqslant 0{,}13; \\ (1000+7{,}5A)\left(0{,}65 + \dfrac{N-Z}{A}\right), \\ \qquad \text{если } \dfrac{N-Z}{A} > 0{,}13, \end{cases}$$

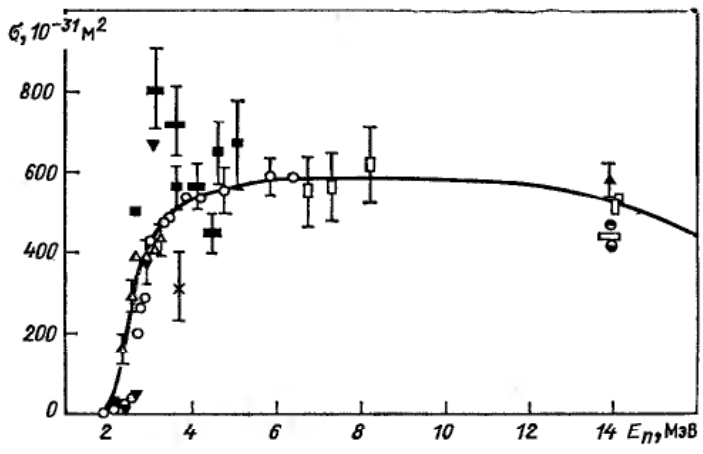


Рис. 41.33. Зависимость сечения ядерной реакции $^{9}Be(n, 2n)^{8}Be$ от энергии нейтронов [30]

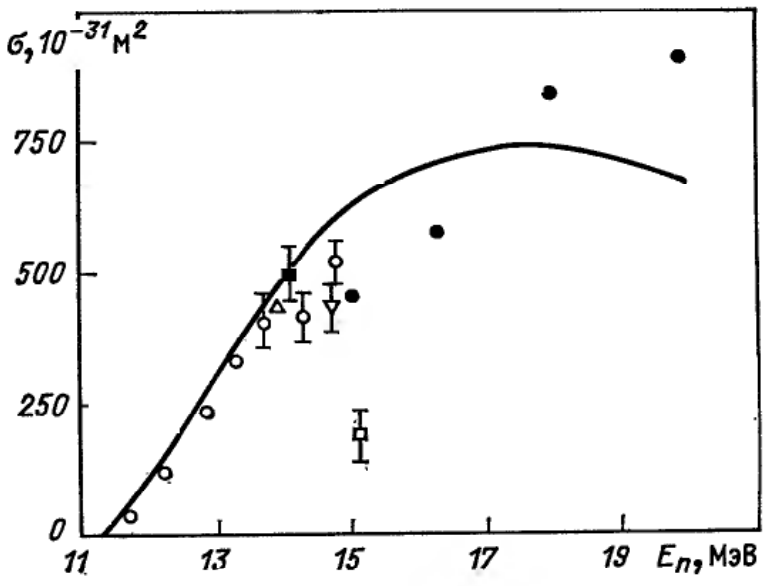


Рис. 41.34. Зависимость сечения ядерной реакции $^{56}Fe\ (n, 2n)^{55}Fe$ от энергии нейтронов [30]

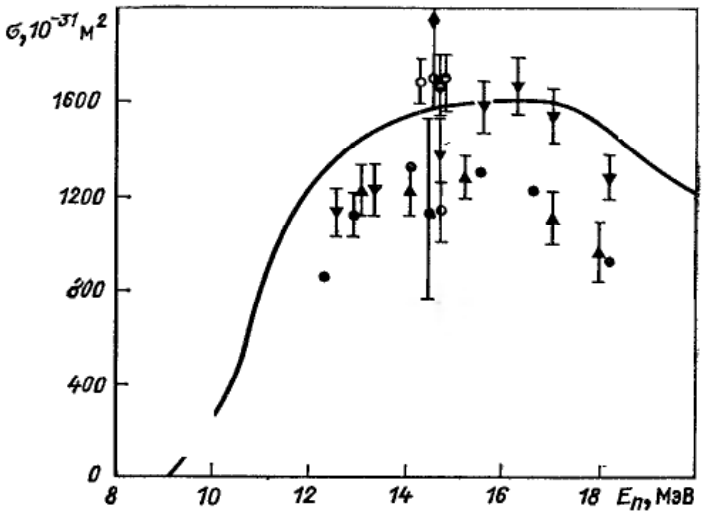


Рис. 41.35. Зависимость сечения ядерной реакции $^{127}I\,(n, 2n)^{126}I$ от энергии нейтронов [30]

где $\sigma_{(n,\,2n)}$ — в 10^{-31} м^2; N и Z — число нейтронов и протонов в ядре-мишени с массовым числом A. Расчетные значения согласуются с экспериментальными данными в пределах 10—15% для ядер с параметрами $(N-Z)/A > 0{,}06$. При $(N-Z)/A < 0{,}06$ результаты вычислений существенно превышают экспериментальные сечения из-за того, что при выводе формулы не учитывалась конкурирующая реакция (n, np) [30].

Таблица 41.8. **Сечения реакций, вызываемых нейтронами с энергией около 14,5 МэВ и нейтронами спектра деления [30, 31]**

Ядро-мишень	Ядерная реакция	Остаточное ядро	Период полураспада продукта реакции	Энергия реакции, МэВ	Сечение при $E = 14{,}5$ МэВ, 10^{-31} м^2	Сечение, усредненное по спектру деления ^{235}U, 10^{-31} м^2
Li-6	(n, p)	He-6	0,808 с	—2,73	8,6 (2)	4,18
	(n, α)	H-3	12,34 года	4,78	25 (3)	—
	$(n, 2n)$	—	—	—3,7	72 (5)	0,158
	(n, np)	—	—	—4,65	170	—
	$(n, n\alpha)$	H-2	Стабильное	—1,47	400	—
	(n, t)	He-4	»	4,785	10	—
Li-7	$(n, 2n)$	Li-6	»	—7,25	22	0,37
	(n, np)	He-6	0,808 с	—10	105	—
	$(n, n\alpha)$	H-3	12,34 года	—2,47	340	—
	(n, d)	He-6	0,808 с	—7,76	10	—
	(n, t)	—	—	—3,42	55	—
	$(n, 3n)$	—	—	—12,92	0,2	—
	$(n, 2n\alpha)$	H-2	Стабильное	—8,72	33	—
Be-9	(n, γ)	Be-10	$2{,}7 \cdot 10^6$ лет	6,81	0,001	—
	(n, p) [31]	Li-9	0,175 с	—12,836	<4	10^{-3}
	(n, α)	He-6	0,808 с	—0,6022	10 (1)	32,8 (3,8)
	$(n, 2n)$	—	—	—1,665	524 (25)	144 (6)
	(n, t)	Li-7	Стабильное	—10,439	20	—
B-10	$(n, 2n)$	—	—	—8,4352	27	0,18
	(n, t)	—	—	0,2318	94 (20)	23,8
	(n, np)	Be-9	Стабильное	—6,59	75	—
B-11	(n, p)	Be-11	13,57 с	—10,726	3,3 (7)	10^{-3}
	(n, α)	Li-8	0,84 с	—6,633	30,5 (3)	0,14 (7)
	$(n, 2n)$	B-10	Стабильное	—11,456	19	0,008
	(n, t)	Be-9	»	—9,559	15	—
C-12	(n, p)	B-12	0,02 с	—12,588	0,19	$0{,}26 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Be-9	Стабильное	—5,7016	80 (20)	0,37
	$(n, 2n)$	C-11	20,38 мин	—18,723	0	$4{,}2\ (1{,}4) \cdot 10^{-7}$
	$(n, n\alpha)$	—	—	—7,37	190	—
N-14	(n, p)	C-14	5730 лет	0,626	80 (15)	—
	(n, α)	B-11	Стабильное	—0,157	—	91
	$(n, 2n)$	N-13	9,97 мин	—10,554	7,3 (1)	$0{,}94 \cdot 10^{-3}$
	(n, d)	C-13	Стабильное	—5,326	49	—
	(n, t)	C-12	»	—4,015	29	—
	(n, np)	C-13	»	—7,55	46 (13)	
	$(n, 2\alpha)$	Li-7	»	—2,62	32	—
O-16	(n, p)	N-16	7,11 с	—9,638	41 (3)	0,019 (1)
	(n, α)	C-13	Стабильное	—2,215	103 (20)	11,3
	$(n, 2n)$	O-15	122 с	—15,669	0	$5{,}3\ (2{,}4) \cdot 10^{-6}$
	(n, d)	N-15	Стабильное	—9,903	150	—
	(n, np)	N-15	»	—12,11	15	—
F-19	(n, d) [31]	O-18	»	—5,77	23	—
	(n, p)	O-19	26,9 с	—4,036	20 (2)	0,83 (2)
	(n, α)	N-16	7,11 с	—1,523	33 (5)	15, 1(2)
	$(n, 2n)$	F-18	109,8 мин	—10,431	57 (10)	$7{,}3\ (7) \cdot 10^{-3}$
	(n, t)	O-17	Стабильное	—7,557	10	—
Ne-20	(n, p)	F-20	11 с	—6,244	92	0,078
	(n, α)	O-17	Стабильное	—0,588	14	12
	$(n, 2n)$	Ne-19	17,22 с	—16,866	0	10^{-3}
Na-23	(n, γ) [31]	Na-24	15 ч	6,96	0,24	—
	(n, p)	Ne-23	37,24 с	—3,596	44 (4)	1,43 (2)
	(n, α)	F-20	11 с	—3,866	150 (10)	0,53 (2)
	$(n, 2n)$	Na-22	2,6 года	—12,418	44 (4)	$2{,}2\ (2) \cdot 10^{-3}$
	(n, np)	Ne-22	Стабильное	—8,79	18	—
Mg-24	(n, γ) [31]	Mg-25	»	7,33	0,25 (E=4 МэВ)	—
	(n, p)	Na-24	15 ч	—4,732	186 (15)	1,48 (82)
	(n, α)	Ne-21	Стабильное	—2,553	63	1,8
	$(n, 2n)$	Mg-23	11,327 с	—16,531	0	0,002
Al-27	(n, γ) [31]	Al-28	2,24 мин	7,73	0,56	—
	(n, p)	Mg-27	9,46 мин	—1,828	74 (5)	3,86 (25)
	(n, α)	Na-24	15 ч	—3,132	118 (5)	0,705 (40)
	$(n, 2n)$	Al-26	$7{,}38 \cdot 10^5$ лет	—13,058	7	$5 \cdot 10^{-3}$

Ядро-мишень	Ядерная реакция	Остаточное ядро	Период полураспада продукта реакции	Энергия ревкции, МэВ	Сечение при $E = 14{,}5$ МэВ, 10^{-31} м²	Сечение, усредненное по спектру деления ^{235}U, 10^{-31} м²
	$(n, 2n)$	Al-26m	6,35 с	—	0	—
	(n, np)	Mg-26	Стабильное	—8,27	50	—
Si-28	(n, γ) [31]	Si-29	—	8,47	0,45	—
	(n, p)	Al-28	2,243 мин	—3,860	260 (25)	6,4 (8)
	(n, α)	Mg-25	Стабильное	—2,653	11	0,56
	$(n, 2n)$	Sl-27	4,11 с	—17,177	0	10^{-3}
	(n, np)	Al-27	Стабильное	—11,59	27	—
P-31	(n, γ) [31]	P-32	14,3 сут	7,94	0,34	—
	(n, p)	Si-31	2,62 ч	—0,709	83 (5)	35,5 (2,7)
	(n, α)	Al-28	2,243 мин	—1,944	110 (10)	1,9 (6)
	$(n, 2n)$	P-30	2,499 мин	—12,307	12,5 (3)	$1{,}09 \cdot 10^{-3}$
	(n, d)	Si-30	Стабильное	—5,073	15	—
	(n, He)	Al-29	6,52 мин	—13,086	0,013	—
	(n, np)	Si-30	Стабильное	—7,30	100	—
S-32	(n, γ) [31]	Si-33	—	8,63	0,54	—
	(n, p)	P-32	14,3 сут	—0,928	230 (10)	66,8 (3,7)
	(n, α)	P-29	Стабильное	1,526	68 (10)	43,6
	$(n, 2n)$	P-31	2,61 с	—15,088	0	$0{,}63 \cdot 10^{-5}$
	(n, t)	P-30	2,499 мин	—12,689	0	$1{,}06 \cdot 10^{-5}$
	(n, np)	P-31	Стабильное	—8,86	78	—
Cl-35	(n, p)	S-35	88 сут	0,615	110 (10)	78 (23)
	(n, α)	P-32	14,3 сут	0,938	117 (10)	8,8 (4,6)
	$(n, 2n)$	Cl-34	1,525 с	—12.646	9 (1)	$0{,}79 \cdot 10^{-3}$
	$(n, 2n)$	Cl-34m	32,06 мин	—	6 (1)	$0{,}51 \cdot 10^{-3}$
Ar-40	(n, p)	Cl-40	1,32 мин	—6,72	18	0,01
	(n, α)	S-37	5,06 мин	—2,486	11,3 (2)	0,11
	$(n, 2n)$	Ar-39	269 лет	—9,871	570	0,15
	(n, np)	Cl-39	56,2 мин	—12,51	1,7	—
K-39	(n, p)	Ar-39	269 лет	0,217	179 (60)	82,2
	(n, α)	Cl-36	$3{,}01 \cdot 10^5$ лет	1,363	115 (30)	8,0 (3)
	$(n, 2n)$	K-38	7,71 мин	—13,085	4 (1)	$0{,}37 \cdot 10^{-3}$
	$(n, 2n)$	K-38m	0,9256 с	—	2 (4)	—
	(n, np)	Ar-38	Стабильное	—6,38	180	—
	$(n, n\alpha)$	Cl-35	»	—7,22	30	—
Ca-40	(n, p)	K-40	$1{,}28 \cdot 10^9$ лет	—0,529	470 (30)	77
	(n, α)	Ar-37	35,06 сут	1,748	320	13 (6)
	$(n, 2n)$	Ca-39	0,86 с	—15,634	0	$3 \cdot 10^{-5}$
	(n, t)	K-38	7,71 мин	—12,933	0,027	—
	(n, np)	K-39	Стабильное	—8,33	200	—
	$(n, n\alpha)$	Ar-36	»	—7,04	23	—
Sc-45	(n, p)	Ca-45	163 сут	0,526	58 (6)	15 (12)
	(n, α)	K-42	12,36 ч	—0,395	55 (5)	0,182 (12)
	$(n, 2n)$	Sc-44	3,99 ч	—11,321	340 (20)	0,04
	$(n, 2n)$	Sc-44m	2,44 сут	—	116 (15)	0,012
	(n, He)	K-43	22,6 ч	—11,341	0,0086	—
	$(n, 2p)$	K-44	22,15 мин	—9,65	0,21	—
Ti-48	(n, p)	Sc-48	43,8 ч	—3,208	66 (5)	0,3 (18)
	(n, α)	Ca-45	163 сут	—2,033	31 (8)	0,013 (6)
	$(n, 2n)$	Ti-47	Стабильное	—11,628	550	0,016
	(n, np)	Sc-47	3,4 сут	—11,45	10	0,0013
V-51	(n, p)	Ti-51	5,8 мин	—1,676	33 (3)	0,456 (23)
	(n, α)	Sc-48	43,8 ч	—2,055	16 (2)	0,022 (3)
	$(n, 2n)$	V-50	Стабильное	—11,052	660 (50)	0,21
	$(n, n\alpha)$	Ti-47	»	—10,29	2	0,000087
Cr-52	(n, p)	V-52	3,76 мин	—3,196	102 (20)	1,09 (8)
	(n, α)	Ti-49	Стабильное	—1,211	40 (4)	0,083
	$(n, 2n)$	Cr-51	27,7 сут	—12,041	357 (30)	0,033
	(n, np)	V-51	Стабильное	—10,5	30	0,005
Mn-55	(n, p)	Cr-55	3,55 мин	—1,806	45 (10)	1,2
	(n, α)	V-52	3,76 мин	—0,626	29 (2)	0,11 (3)
	$(n, 2n)$	Mn-54	312,3 сут	—10,224	809 (35)	0,244 (15)
	(n, He)	V-53	1,55 мин	—12,709	0,8 (3)	—

Ядро-мишень	Ядерная реакция	Остаточное ядро	Период полураспада продукта реакции	Энергия реакции, МэВ	Сечение при E=14,5 МэВ, 10^{-31} м²	Сечение, усредненное по спектру деления ^{235}U, 10^{-31} м²
Fe-56	(n, p)	Mn-56	2,579 ч	—2,918	110 (10)	1,03 (75)
	(n, α)	Cr-53	Стабильное	0,321	40	0,397 (12)
	$(n, 2n)$	Fe-55	2,72 года	—11,203	540 (40)	0,0754
	(n, t)	Mn-54	312,3 сут	—11,931	0,045	—
	(n, np)	Mn-55	Стабильное	—10,19	35	0,0051
Co-59	(n, p)	Fe-59	45,1 сут	—0,783	60 (10)	1,42 (14)
	(n, α)	Mn-56	2,579 ч	0,320	29 (2)	0,143 (10)
	$(n, 2n)$	Co-58	70,78 сут	—10,46	707 (70)	0,40 (4)
	$(n, 2n)$	Co-58*m*	9,15 ч	—	380	—
	(n, He)	Mn-57	1,61 мин	—11,47	0,0046	—
Ni-58	(n, p)	Co-58	70,78 сут	0,395	374 (30)	108,5 (5,4)
	(n, p)	Co-58*m*	9,15 ч	—	200	35,4 (2,2)
	(n, α)	Fe-55	2,72 года	2,89	120 (15)	3,0 (9)
	$(n, 2n)$	Ni-57	36,16 ч	—12,203	30 (3)	$5,77(31)\cdot10^{-3}$
	(n, t)	Co-56	78,76 сут	—11,073	0,092	—
	(n, np)	Co-57	270,9 сут	—8,18	400	0,21
	$(n, n\alpha)$	Fe-54	Стабильное	—6,39	30	0,0014
Cu-63	(n, p)	Ni-63	100,1 года	0,716	120 (30)	9,8
	(n, α)	Co-60	5,27 года	1,715	35 (8)	0,50 (56)
	(n, α)	Co-60*m*	10,47 мин	—	25	—
	$(n, 2n)$	Cu-62	9,74 мин	—10,854	551 (30)	0,12 (12)
	(n, He)	Co-61	1,65 ч	—9,528	0,113 (4)	—
Zn-64	(n, p)	Cu-64	12,71 ч	0,208	176 (20)	29,9 (1,6)
	(n, α)	Ni-61	Стабильное	3,867	57,5	1,1
	$(n, 2n)$	Zn-63	38,1 мин	—11,856	178 (15)	0,017
	(n, t)	Cu-62	9,74 мин	—10,08	0,086 (23)	—
Ga-69	(n, p)	Zn-69	55,6 мин	—0,124	34 (3)	1,5
	(n, p)	Zn-69*m*	14 ч	—	25 (2)	0,496 (73)
	(n, α)	Cu-66	5,1 мин	2,584	18 (2)	0,2
	$(n, 2n)$	Ga-68	68 мин	—10,31	945 (50)	0,227
As-75	(n, p)	Ge-75	82,78 мин	—0,406	19,2 (2)	0,45 (15)
	(n, p)	Ge-75*m*	48,3 с	—	18	—
	(n, α)	Ga-72	14,1 ч	1,205	11,6 (1)	$7,1\cdot10^{-3}$
	$(n, 2n)$	As-74	17,78 сут	—10,243	1061 (40)	0,33 (2)
	(n, He)	Ga-73	4,86 ч	—10,15	0,0035	—
Se-80	(n, p)	As-80	16,5 с	—5,22	7,2	$3,8\cdot10^{-3}$
	(n, α)	Ge-77	11,3 ч	—0,95	2,6 (4)	$1,2\cdot10^{-3}$
	$(n, 2n)$	Se-79	$6,5\cdot10^{4}$ лет	—9,896	1132 (60)	0,432
Br-79	$(n, 2n)$	Se-79*m*	3,91 мин	—	90	—
	(n, p)	Se-79	$6,5\cdot10^{4}$ лет	0,641	31	0,87
	(n, p)	Se-79*m*	3,91 мин	—	10	—
	(n, α)	As-76	26,32 ч	1,859	12,7 (1,5)	0,031
Kr-84	$(n, 2n)$	Br-78	6,46 мин	—10,693	974 (50)	0,204
	(n, p)	Br-84	31,8 мин	—3,92	8 (1,5)	$9,3\cdot10^{-3}$
	(n, α)	Se-81	18,5 мин	—0,4	4,7	$1,5\cdot10^{-3}$
Rb-85	$(n, 2n)$	Kr-83	Стабильное	—10,518	1290	0,33
	(n, p)	Kr-85	10,71 года	0,0955	18,3	0,26
	(n, p)	Kr-85*m*	4,48 ч	—	5 (5)	—
	(n, α)	Br-82	35,3 ч	0,991	5,9 (1)	$5,3\cdot10^{-3}$
	$(n, 2n)$	Rb-84	32,77	—10,6	1123 (100)	0,37 (1)
Sr-88	$(n, 2n)$	Rb-84*m*	20,5 мин	—	350	—
	(n, p)	Rb-88	17,8 мин	—4,522	15 (2)	$3,8\cdot10^{-3}$
	(n, α)	Kr-85	10,71 года	—0,788	6	$5,9\cdot10^{-3}$
	$(n, 2n)$	Sr-87	Стабильное	—11,113	1200	0,14
Y-89	$(n, 2n)$	Sr-87*m*	2,805 ч	—	318 (30)	0,0451
	(n, p)	Sr-89	50,55 сут	—0,707	24,6 (3)	0,31 (6)
	(n, α)	Rb-86	18,66 сут	0,699	5,4 (1)	$8,3\cdot10^{-3}$
Zr-90	$(n, 2n)$	Y-88	107,15 сут	—11,468	966 (100)	0,156 (11)
	(n, p)	Y-90	64,1 ч	—1,506	45 (3)	0,38 (2)
	(n, p)	Y-90*m*	3,19 ч	—	9,1	—
	(n, α)	Sr-87	Стабильное	1,75	14	0,014
	(n, α)	Sr-87*m*	2,805 ч	—	4,1 (3)	—
	$(n, 2n)$	Zr-89	78,43 ч	—11,983	768 (30)	0,076(1)

Ядро-мишень	Ядерная реакция	Остаточное ядро	Период полураспада продукта реакции	Энергия реакции, МэВ	Сечение при $E = 14{,}5$ МэВ, 10^{-31} м^2	Сечение, усредненное по спектру деления ^{235}U, 10^{-31} м^2
	$(n, 2n)$	Zr-89*m*	4,18 мин	—	86 (8)	—
	(n, t)	Y-88	107,15 сут	—11,352	0,041	—
Nb-93	(n, p)	Zr-93	$1{,}53 \cdot 10^6$ лет	0,719	35	1,0
	(n, α)	Y-90	64,1 ч	4,914	9,5 (5)	0,0974 (68)
	(n, α)	Y-90*m*	3,19 ч	—	5	0,0267 (17)
	$(n, 2n)$	Nb-92	$1{,}2 \cdot 10^8$ лет	—8,826	1375 (70)	1,04
	$(n, 2n)$	Nb-92*m*	10,13 сут	—	482 (35)	0,475 (32)
	(n, He)	Y-91	58,51 сут	—7,719	0,0031	—
Mo-98	(n, p)	Nb-98	2,86 с	—3,82	11 (4)	0,015
	(n, α)	Zr-95	64,05 сут	3,202	6,5 (1)	0,014 (2)
	$(n, 2n)$	Mo-97	Стабильное	—8,642	1370	1,3
Tc-99	(n, p)	Mo-99	66,02 ч	—	12 (3)	0,10
	(n, α)	Nb-96	23,35 ч	—	7 (1)	0,065
	$(n, 2n)$	Tc-98	$4{,}2 \cdot 10^6$ лет	—	1230 (120)	1,02
	(n, nd)	Nb-95	34,97 сут	—	1,3 (2)	—
Ru-102	(n, p)	Tc-102	5,28 с	—3,72	17,3	0,012
	(n, p)	Tc-102*m*	4,35 мин	—	5,7	—
	(n, α)	Mo-99	66,02 ч	2,502	5 (1)	0,007
	$(n, 2n)$	Ru-101	Стабильное	—9,216	1390	0,802
Rh-103	(n, p)	Ru-103	39,35 сут	0,0198	16 (1)	0,107 (6)
	(n, α)	Tc-100	15,8 с	3,48	11 (2)	0,016
	$(n, 2n)$	Rh-102	207 сут	—9,31	1325 (100)	0,729
	$(n, 2n)$	Rh-102*m*	2,89 года	—	380	0,715
	(n, He)	Tc-101	14,2 мин	—8,55	0,016 (7)	—
Pd-106	(n, p)	Rh-106	29,9 с	—2,758	23 (6)	0,04
	(n, p)	Rh-106*m*	132 мин	—	5,7	—
	(n, α)	Ru-103	39,35 сут	2,998	5,6 (7)	$7 \cdot 10^{-3}$
	$(n, 2n)$	Pd-105	Стабильное	—9,561	1400	$6{,}11 \cdot 10^{-1}$
Ag-107	(n, p)	Pd-107	$6{,}5 \cdot 10^6$ лет	0,747	41	0,47
	(n, p)	Pd-107*m*	21,3 с	—	15	—
	(n, α)	Rh-104	42,3 с	4,182	10,8	0,025
	$(n, 2n)$	Ag-106	23,96 мин	—9,551	1260 (120)	0,601
	$(n, 2n)$	Ag-106*m*	8,41 сут	—	400	—
Cd-114	(n, p)	Ag-114	4,52 с	—4,22	5 (2)	0,003
	(n, α)	Pd-111	22 мин	1,66	0,65 (1)	$5 \cdot 10^{-4}$
	(n, α)	Pd-111*m*	5,5 ч	—	0,13	—
	$(n, 2n)$	Cd-113	Стабильное	—9,041	1500	1,07
	$(n, 2n)$	Cd-113*m*	13,6 года	—	860	—
In-115	(n, p)	Cd-115	53,46 ч	0,668	15 (5)	0,041
	(n, p)	Cd-115*m*	44,6 сут	—	7	—
	(n, α)	Ag-112	3,12 ч	2,68	2,5 (5)	10^{-3}
	$(n, 2n)$	In-114	71,9 с	—9,029	1710 (80)	1,07
	$(n, 2n)$	In-114*m*	49,5 сут	—	1262 (100)	0,761
	(n, He)	Ag-113	5,37 ч	—9,34	0,007	—
Sn-120	(n, p)	In-120	3,08 ч	—4,82	4,3 (7)	0,001
	(n, α)	Cd-117	2,4 ч	0,96	2,6	10^{-4}
	$(n, 2n)$	Sn-119	Стабильное	—9,104	1560	1,03
Sb-121	(n, p)	Sn-121	27,06 ч	0,395	9,1	0,16
	(n, α)	In-118	5 с	3,51	3,6	$4 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Sb-120	15,89 мин	—9,248	1580 (100)	0,846
	$(n, 2n)$	Sb-120*m*	5,76 сут	—	610	—
Te-130	(n, p)	Sb-130	6,33 мин	—4,22	1,8 (3)	0,002
	(n, p)	Sb-130*m*	40,9 мин	—	0,6	—
	(n, α)	Sn-127	2,1 ч	1,810	0,4 (1)	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Te-129	69,6 мин	—8,413	1700 (120)	1,80
	$(n, 2n)$	Te-129*m*	33,5 сут	—	1000	—
	(n, He)	Sn-128	59,3 мин	—10,797	0,015 (8)	—
I-127	(n, p)	Te-127	9,35 ч	0,09	9 (3)	0,068
	(n, p)	Te-127*m*	109 сут	—	6 (2)	0,013 (1)
	(n, p)	Te-127*g*	9,35 ч	—	—	0,009 (5)
	(n, α)	Sb-124	60,2 сут	4,279	1,4 (2)	0,003
	$(n, 2n)$	I-126	12,93 сут	—9,139	1496 (100)	1,05 (65)

Ядро-мишень	Ядерная реакция	Остаточное ядро	Период полураспада продукта реакции	Энергия реакции, МэВ	Сечение при $E = 14{,}5$ МэВ, 10^{-31} м^2	Сечение, усредненное по спектру деления ^{235}U, 10^{-31} м^2
Xe-132	(n, p)	I-132	2,3 ч	—2,798	3,0 (5)	0,012
	(n, α)	Te-129	69,6 мин	3,372	1,7	$7 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Xe-131	Стабильное	—8,936	1670	1,068
	$(n, 2n)$	Xe-131*m*	11,9 сут	—	770	—
Cs-133	(n, p)	Xe-133	5,245 сут	0,355	11,3 (2)	0,081
	(n, p)	Xe-133*m*	2,191 сут	—	4,8 (8)	—
	(n, α)	I-130	12,36 ч	4,448	1,3 (3)	0,0033 (8)
	(n, α)	I-130*m*	9 мин	—	0,54 (8)	—
	$(n, 2n)$	Cs-132	6,475 сут	—8,979	1603 (100)	0,992
	(n, d)	Xe-132	Стабильное	—3,87	0,9	—
	(n, He)	I-131	8,04 сут	—	0,0032	—
Ba-138	(n, p)	Cs-138	33,41 мин	—4,62	3,0 (5)	$5 \cdot 10^{-4}$
	(n, α)	Xe-135	9,083 ч	3,875	2,6 (3)	0,0019 (3)
	(n, α)	Xe-135*m*	15,65 мин	—	0,55	—
	$(n, 2n)$	Ba-137	Стабильное	—8,612	1720	1,71
	$(n, 2n)$	Ba-137*m*	2,55 мин	—	1250	—
La-139	(n, p)	Ba-139	84,9 мин	—1,478	4,8 (4)	$4 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Cs-136	12,98 сут	4,817	1,8 (3)	$2 \cdot 10^{-3}$
	$(n, 2n)$	La-138	Стабильное	—8,778	1710	1,40
Ce-140	(n, p)	La-140	40,22 ч	—2,984	6,5 (5)	$5 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Ba-137	Стабильное	5,338	11,5 (1)	$3 \cdot 10^{-3}$
	$(n, 2n)$	Ce-139	139,3 сут	—9,203	1750 (70)	1,32
	$(n, 2n)$	Ce-139*m*	56,2 с	—	963 (120)	—
Pr-141	(n, p)	Ce-141	32,5 сут	0,201	9 (1)	0,035
	(n, α)	La-138	Стабильное	6,146	3,2	$7 \cdot 10^{-3}$
	$(n, 2n)$	Pr-140	3,39 мин	—9,397	1660 (200)	1,1
Nd-142	(n, p)	Pr-142	19,13 ч	—1,381	14 (2)	0,042
	(n, α)	Ce-139	139,3 сут	6,642	7,1 (8)	0,01
	$(n, 2n)$	Nd-141	2,42 ч	—9,813	1701 (120)	0,627
	$(n, 2n)$	Nd-141*m*	62,1 с	—	600 (50)	—
Sm-152	(n, p)	Pm-152	3,8 мин	—2,62	3,7 (4)	$5 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Nd-149	1,73 ч	5,275	1,7 (2)	$8 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Sm-151	90 лет	—8,267	1855 (150)	2,34
Eu-153	(n, p)	Sm-153	46,44 ч	—0,02	6 (1)	0,015
	(n, α)	Pm-150	2,68 ч	5,83	2,2 (3)	10^{-3}
	$(n, 2n)$	Eu-152	13,2 года	—8,555	1950 (200)	2,15
	$(n, 2n)$	Eu-152*m*1	9,3 ч	—	500 (100)	—
	$(n, 2n)$	Eu-152*m*2	96 мин	—	70	—
Gd-158	(n, p)	Eu-158	45,9 мин	—2,65	2,5	$4 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Sm-155	22,1 мин	5,16	1,4	$3 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Gd-157	Стабильное	—7,931	1900	3,76
Tb-159	(n, p)	Gd-159	18,6 ч	—0,168	4,7 (7)	0,01
	(n, α)	Eu-156	15,19 сут	6,215	1,8	$8 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Tb-158	150 лет	—8,136	1800 (120)	3,02
	$(n, 2n)$	Tb-158*m*	10,5 с	—	450 (65)	—
Dy-164	(n, p)	Tb-164	2,9 мин	—2,56	2,8 (5)	$3 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Gd-161	3,6 мин	5,207	1,2	$2 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Dy-163	Стабильное	—7,655	1950	4,88
Ho-165	(n, p)	Dy-165	2,334 ч	—0,513	3,2	$4 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Tb-162	7,7 мин	6,460	1,5	$6 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Ho-164	29 мин	—7,989	2000 (200)	3,49
	$(n, 2n)$	Ho-164*m*	37,5 мин	—	1200 (200)	—
Er-166	(n, p)	Ho-166	27 ч	—1,077	4,5 (7)	0,022
	(n, α)	Dy-163	Стабильное	7,094	2	10^{-3}
	$(n, 2n)$	Er-165	10,36 ч	—8,474	1960 (150)	2,25
Tm-169	(n, p)	Er-169	9,3 сут	0,431	4,6	0,014
	(n, α)	Ho-166	27 ч	7,44	1,8	10^{-3}
	$(n, 2n)$	Tm-168	93,1 сут	—8,06	2071 (100)	3,43
Yb-174	(n, p)	Tm-174	5,4 мин	—2,28	3,5 (1,0)	$3 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Er-171	7,52 ч	6,414	1,2 (2)	$2 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Yb-173	Стабильное	—7,469	2020	5,67
Lu-175	(n, p)	Yb-175	4,19 сут	0,314	3,7 (5)	$8 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Tm-172	63,6 ч	7,867	1,6	10^{-3}

Ядро-мишень	Ядерная реакция	Остаточное ядро	Период полураспада продукта реакции	Энергия реакции, МэВ	Сечение при $E = 14{,}5$ МэВ, 10^{-31} м²	Сечение, усредненное по спектру деления ^{235}U, 10^{-31} м²
	$(n, 2n)$	Lu-174	3,31 года	—7,659	2030 (200)	4,79
	$(n, 2n)$	Lu-174*m*	142 сут	—	630 (50)	—
Hf-180	(n, p)	Lu-180	5,7 мин	—2,52	1,9	10^{-3}
	(n, α)	Yb-177	1,9 ч	6,856	1,1	$2 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Hf-179	Стабильное	—7,388	2080	6,88
	$(n, 2n)$	Hf-179*m*	18,68 с	—	600	—
Ta-181	(n, p)	Hf-181	42,4 сут	—0,240	4,5 (5)	$1 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Lu-178	28,4 мин	7,41	1,4	$3 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Ta-180	10^{13} лет	—7,644	2090 (100)	4,96
	$(n, 2n)$	Ta-180*m*	8,1 ч	—	1110 (100)	—
	(n, He)	Lu-179	4,59 ч	—6,56	0,0034	—
W-184	(n, p)	Ta-184	8,7 ч	—2,248	4,0 (1,0)	$2 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Hf-181	42,4 сут	7,369	1,2 (2)	$2\ (5) \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	W-183	Стабильное	—7,411	2100	6,55
	$(n, 2n)$	W-183*m*	5,15 с	—	1600	—
	(n, np)	Ta-183	5,1 сут	—	0,7 (2)	—
Re-187	(n, p)	W-187	23,9 ч	—0,529	4,3 (5)	$2 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Ta-184	8,7 ч	7,102	1,2	$1 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Re-186	90,64 ч	—7,371	1700 (200)	10 (6)
	(n, He)	Ta-185	49 мин	—6,6	0,004 (3)	—
Os-192	(n, p)	Re-192	16 с	—3,19	1,3	$3 \cdot 10^{-4}$
	(n, α)	W-189	11,5 мин	5,24	—	$1 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Os-191	15,4 сут	—7,559	2120 (150)	5,40
Ir-193	(n, p)	Os-193	31,5 ч	—0,350	3,8 (5)	$1 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Re-190	3,1 мин	6,64	1,1	$1 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Ir-192	74,02 сут	—7,772	2048 (150)	3,71
Pt-195	(n, p)	Ir-195	2,5 ч	—0,153	2,0 (5)	$2 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Os-192	Стабильное	8,711	1,1	$4 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Pt-194	Стабильное	—6,124	2190	18,5
Au-197	(n, p)	Pt-197	18,3 ч	0,036	2,1 (2)	$2 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Ir-194	19,15 ч	6,979	0,35 (5)	$1 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Au-196	6,18 сут	—8,08	2254 (200)	3,0 (3)
	$(n, 2n)$	Au-196*m*	9,7 ч	—	230	—
Hg-202	(n, p)	Au-202	29 с	—2,72	1,6	$4 \cdot 10^{-4}$
	(n, α)	Pt-199	31 мин	5,706	0,9	$1 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Hg-201	Стабильное	—7,756	2160	4,45
Tl-205	(n, p)	Hg-205	5,2 мин	—0,747	1,9 (2)	$5 \cdot 10^{-4}$
	(n, α)	Au-202	29 с	5,68	0,85	$1 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Tl-204	3,78 года	—7,541	2006 (200)	5,61
Pb-208	(n, p)	Tl-208	3,07 мин	—4,211	1,0 (5)	$1 \cdot 10^{-4}$
	(n, α)	Hg-205	5,2 мин	6,186	0,8	$1 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Pb-207	Стабильное	—7,368	2300	6,18
	$(n, 2n)$	Pb-207*m*	0,8 с	—	1282	—
Bi-209	(n, p)	Pb-209	3,31 ч	0,135	0,8 (2)	$1 \cdot 10^{-3}$
	(n, α)	Tl-206	4,2 мин	9,634	0,8 (3)	$3 \cdot 10^{-4}$
	$(n, 2n)$	Bi-208	$3{,}68 \cdot 10^5$ лет	—7,453	2261 (100)	5,92
Th-232 [31]	(n, γ)	Th-233	22,2 мин	4,79	5,0	—
	$(n, 2n)$	Th-231	25,5 ч	—6,43	1160	—
	(n, α)	Ra-229	—	8,08	4,6	—
	$(n, 3n)$	Th-230	—	—11,6	850	—
U-238 [31]	(n, γ)	U-239	23,5 мин	4,80	1	—
	$(n, 2n)$	U-237	6,75 дня	—6,14	700—900	—
	(n, p)	Pa-238	—	—3,18	1,5	—
	(n, t)	Pa-236	12 мин	—5,10	0,02	
	(n, α)	Th-235	—	9,07	1,5	—
	$(n, 3n)$	U-236	$2{,}39 \cdot 10^7$ лет	—11,27	500	—
	(n, np)	Pa-237	39 мин	—7,66	0,23	—

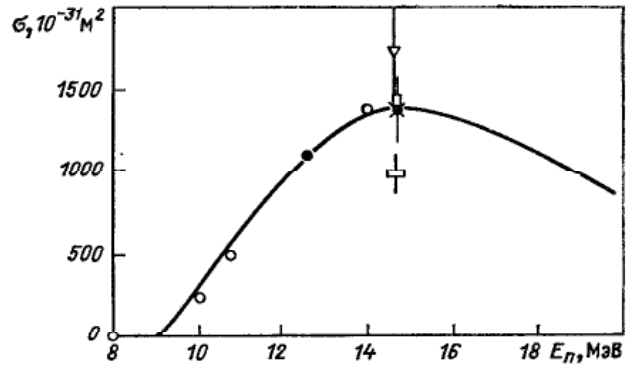


Рис. 41.36. Зависимость сечения ядерной реакции $^{208}Pb(n, 2n)^{207m}Pb$ от энергии нейтронов [30]

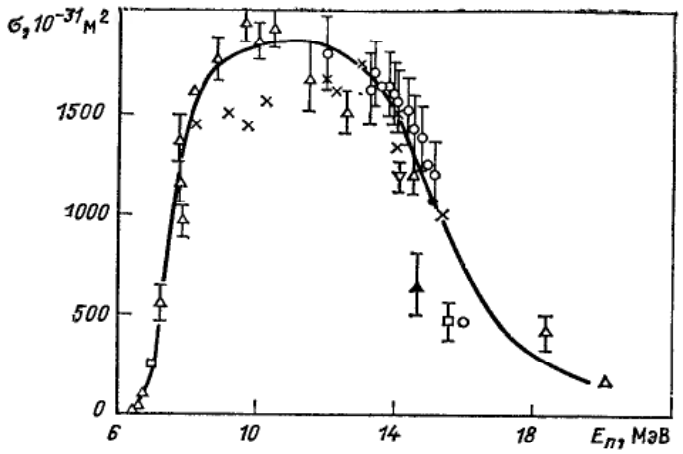


Рис. 41.37. Зависимость сечения ядерной реакции $^{232}Th(n, 2n)^{231}Th$ от энергии нейтронов [30]

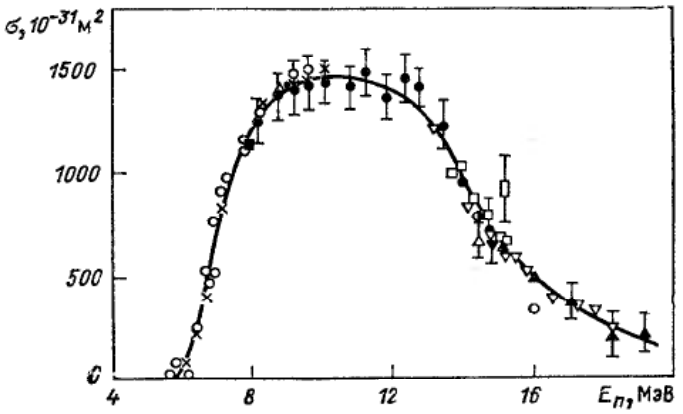


Рис. 41.38. Зависимость сечения ядерной реакции $^{238}U(n, 2n)^{237}U$ от энергии нейтронов [30]

41.9. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ (n, p)

Для оценки сечения ядерной реакции (n, p) в области энергий нейтронов примерно от 14 до 15 МэВ можно воспользоваться формулой, которая дает результаты, согласующиеся в пределах 25%-ной погрешности с экспериментальными данными для большинства ядер [30]:

$$\sigma_{(n,p)}=43{,}5\left(A^{1/3}+1\right)\exp\left\{0{,}083\sqrt{A}\times\right.$$
$$\left.\times\left[-50\,\frac{(N-Z-1)}{A}+0{,}58\,\frac{(Z-1)}{A^{1/3}}-3{,}26\right]\right\},$$

где $\sigma_{(n,p)}$ — в 10^{-31} м^2.

41.10. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ (n, α)

Предлагаемая формула для оценки сечения ядерной реакции с участием нейтронов энергией приблизительно от 14 до 15 МэВ дает результаты, согласующиеся с экспериментальными данными в пределах погрешности 40% [30, 31]:

$$\sigma_{(n,\alpha)}=17{,}84\,\exp\left[-33\,(N-Z)/A\right],$$

где $\sigma_{(n,\alpha)}$ — в 10^{-31} м^2.

41.11. ЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ (n, t)

Для оценки сечения ядерной реакции (n, t) в области энергий нейтронов примерно от 14 до 15 МэВ предлагается формула, согласующаяся с экспериментальными данными в пределах 70%-ной погрешности:

$$\sigma_{(n,t)}=4{,}52\left(A^{1/3}+1\right)\exp\left[-10\,(N-Z)/A\right],$$

где $\sigma_{(n,t)}$ — в 10^{-31} м^2.

41.12. АКТИВАЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Многие элементы имеют большое сечение активации и дают радиоактивные продукты с удобными для измерений периодами полураспада. Измерение спектров быстрых нейтронов активационным методом основано на применении в качестве детекторов материалов, сечения которых отличаются от нуля лишь после определенной пороговой энергии. Подробно активационные методы спектрометрии нейтронов изложены в [32—36, 44].

Характеристики активационных и пороговых детекторов приведены в табл. 41.9, 41.10. Использованы следующие обозначения: T_n — температура нейтронов; тепловая, резонансная и быстрая — области энергии нейтронов; для резонансной области в скобках указано значение пороговой энергии $E_{пор}$; $\gamma_{сп}$ — метод гамма-спектроскопии; $\beta_{сп}$, $4\pi\beta$, γ—γ и т. п. — методы измерения наведенной активности.

Характеристики детекторов, применяемых при спектрометрии на сборках с источником нейтронов на энергию 14 МэВ, представлены на рис. 41.39 и 41.40 [43].

Таблица 41.9. **Краткая характеристика детекторов различного типа [33]**

Элемент; для пороговых детекторов элемент и тип реакции	Материал детектора	Температура среды, К	Область применения	Толщина, 10^{-3} кг/м^2	Плотность потока нейтронов, нейтр/(с·м^2)	Метод измерения активности
Na	Таблетки (прессование)	1000	Резонансная (2950 эВ)	150—2000	10^9—10^{14}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
V	Фольга	1300	$1/v$	50	10^9—10^{14}	$4\pi\beta$
Cr	Фольга	800	Резонансная, $1/v$	10—400	10^{12}—10^{18}	$\gamma_{сп}$
Mn	Керамика	1300	Тепловая, резонансная (337 эВ)	3—1000	10^9—10^{18}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
	Сплав	650	—	—	—	—
	Полиэтилен	350	—	—	—	—
Co	Фольга (электролиз)	900	Тепловая, резонансная (132 эВ)	0,5—700	10^{13}—10^{18}	$\gamma_{сп}$, $\gamma-\gamma$
	Сплав	650	—	—	—	—
	Полиэтилен	350	—	—	—	—
Cu	Фольга	800	Резонансная (580 эВ)	50—300	10^9—10^{18}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
Ag	Сплав	650	Резонансная (5,2 эВ)	0,5—10	10^{12}—10^{18}	$\gamma_{сп}$
In	Фольга	400	Тепловая, резонансная (1,44 эВ)	0,5—10	10^7—10^{18}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
	Сплав	650	—	—	—	—
La	Керамика	1300	Резонансная (73,5 эВ)	5—200	10^{10}—10^{18}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
	Сплав	650	—	—	—	—
	Полиэтилен	350	—	—	—	—
Sm	Керамика	1300	Резонансная (8,0 эВ)	1,0—20	10^{10}—10^{18}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
	Сплав	650	—	—	—	—
	Полиэтилен	350	—	—	—	—
Eu	Керамика	1300	T_n	0,3—800	10^9—10^{14}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
	Сплав	650	—	—	—	—
	Полиэтилен	350	—	—	—	—
Dy	Керамика	1300	T_n, тепловая, резонансная	3—40	10^9—10^{18}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
	Сплав с алюминием	650	—	—	—	—
	Полиэтилен	400	—	—	—	—
Lu	Керамика	1300	T_n, тепловая	1,3—800	10^9—10^{18}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
	Сплав	650	—	—	—	—
	Полиэтилен	350	—	—	—	—
W	Фольга (прокат, электролиз)	1300	Резонансная (18,8 эВ)	0,5—400	10^{10}—10^{18}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
	Сплав	650	—	—	—	—
	Полиэтилен	350	—	—	—	—
Au	Фольга (прокат)	900	Тепловая	0,5—600	10^9—10^{16}	$\gamma_{сп}$, $4\pi\beta$
	Сплав	650	—	—	—	—
Mg (n, p)	Фольга	650	Быстрая, $>$ 7 МэВ	1,0—10	10^{12}	$\gamma_{сп}$
	Керамика	1300	—	—	—	—
Al (n, p)	Фольга	800	Быстрая, $>$ 4 МэВ	1,0—10	10^{13}	$\gamma_{сп}$
	Керамика	1300	—	—	—	—
S (n, p)	Таблетки (прессование)	400	Быстрая, $>$ 2 МэВ	10—30	10^{11}	$\beta_{сп}$
^{56}Fe (n, p)	Фольга (прессование)	1200	Быстрая, $>$ 3,7 МэВ	1—10	10^{12}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
Ni (n, p)	Фольга	1200	Быстрая, $>$ 3,0 МэВ	1—10	10^{12}	$\gamma_{сп}$
^{65}Cu $(n, 2n)$	Фольга	800	Быстрая, $>$ 9,0 МэВ	1—10	10^{13}	$\gamma_{сп}$, $\beta_{сп}$
^{64}Zn (n, p)	Фольга	800	Быстрая, $>$ 3 МэВ	1—10	10^{12}	$\gamma_{сп}$
Rh (n, n')	Фольга	1300	Быстрая, $>$ 0,8 МэВ	0,1—10	10^{11}	x, $4\pi\beta-x$
In (n, n')	Фольга	400	Быстрая, $>$ 1,4 МэВ	0,1—10	10^{11}	$\gamma_{сп}$
	Керамика	1300	—	—	—	—
Er (n, γ)	Керамика	1300	T_n	0,5—40	10^9—10^{18}	$\gamma_{сп}$
	Полиэтилен	350	—	—	—	—
Ir (n, γ)	Фольга	1300	T_n, тепловая, резонансная	3—100	10^{12}—10^{18}	$\gamma_{сп}$
	Сплав	650	—	—	—	—

Таблица 41.10. Характеристики пороговых детекторов [32]

Тип ядерной реакции	$E_{пор}$, МэВ [35]	Период полураспада продукта реакции	E_γ, МэВ	Выход γ-квантов на распад	$E_{эф}$, МэВ	$\sigma_{эф}$, 10^{-34} м²
$^{103}Rh\ (n,\ n')\ ^{103m}Rh$	0,1	56,1 мин	0,020	1,00	0,8	935 (45)
$^{115}In\ (n,\ n')\ ^{115m}In$	0,32	4,5 ч	0,333	0,46	1,15	985 (10)
$^{238}U\ (n,\ f)$	0,5	—	—	—	1,6	974 (68)
$^{232}Th\ (n,\ f)$	1,0	—	—	—	1,6	143 (36)
$^{64}Zn\ (n,\ p)\ ^{64}Cu$	0,96	12,78 ч	0,511	0,38	2,6	158 (8)
$^{32}S\ (n,\ p)\ ^{32}P$	0,92	14,3 сут	$E_\beta = 1,71$	1,0	2,6	232 (37)
$^{58}Ni\ (n,\ p)\ ^{58}Co$	1,0	71,3 сут	0,511	0,30	2,6	416 (37)
$^{54}Fe\ (n,\ p)\ ^{54}Mn$	1,1	312,6 сут	0,835	1,0	3,0	398 (36)
$^{27}Al\ (n,\ p)\ ^{27}Mg$	1,8	9,46 мин	0,84	0,70	4,5	51,3 (4,5)
$^{90}Zr\ (n,\ p)\ ^{90}Y$	3,5	64,4 ч	$E_\beta = 2,27$	1,0	6,2	15,8 (1)
$^{56}Fe\ (n,\ p)\ ^{56}Mn$	2,9	2,58 ч	0,847	0,99	6,6	65,3 (4,8)
$^{24}Mg\ (n,\ p)\ ^{24}Na$	4,9	15,0 ч	1,369	1,0	7,2	143 (9)
$^{59}Co\ (n,\ \alpha)\ ^{56}Mn$	5,0	2,58 ч	0,847	0,99	7,1	13,7 (1,2)
$^{27}Al\ (n,\ \alpha)\ ^{24}Na$	4,8	15,0 ч	1,369	1,0	7,4	75,5 (3,2)
$^{232}Th\ (n,\ 2n)\ ^{232}Th$	6,5	25,64 ч	$E_\beta = 0,30$	1,0	7,6	1620 (90)
$^{65}Cu\ (n,\ 2n)\ ^{64}Cu$	10,0	12,78 ч	0,511	0,38	11,2	670 (100)
$^{55}Mn\ (n,\ 2n)\ ^{54}Mn$	10,4	312,6 сут	0,835	1,0	11,7	540 (120)
$^{19}F\ (n,\ 2n)\ ^{18}F$	11,0	109,8 мин	0,511	1,94	12,8	50 (8)
$^{63}Cu\ (n,\ 2n)\ ^{62}Cu$	11,0	9,76 мин	0,511	1,95	12,9	620 (70)
$^{58}Ni\ (n,\ 2n)\ ^{57}Ni$	12,5	36,0 ч	1,37	0,86	13,7	38,0 (4,4)
$^{64}Zn\ (n,\ 2n)\ ^{63}Zn$	12,5	38,4 мин	1,15	0,49	14,8	690 (40)

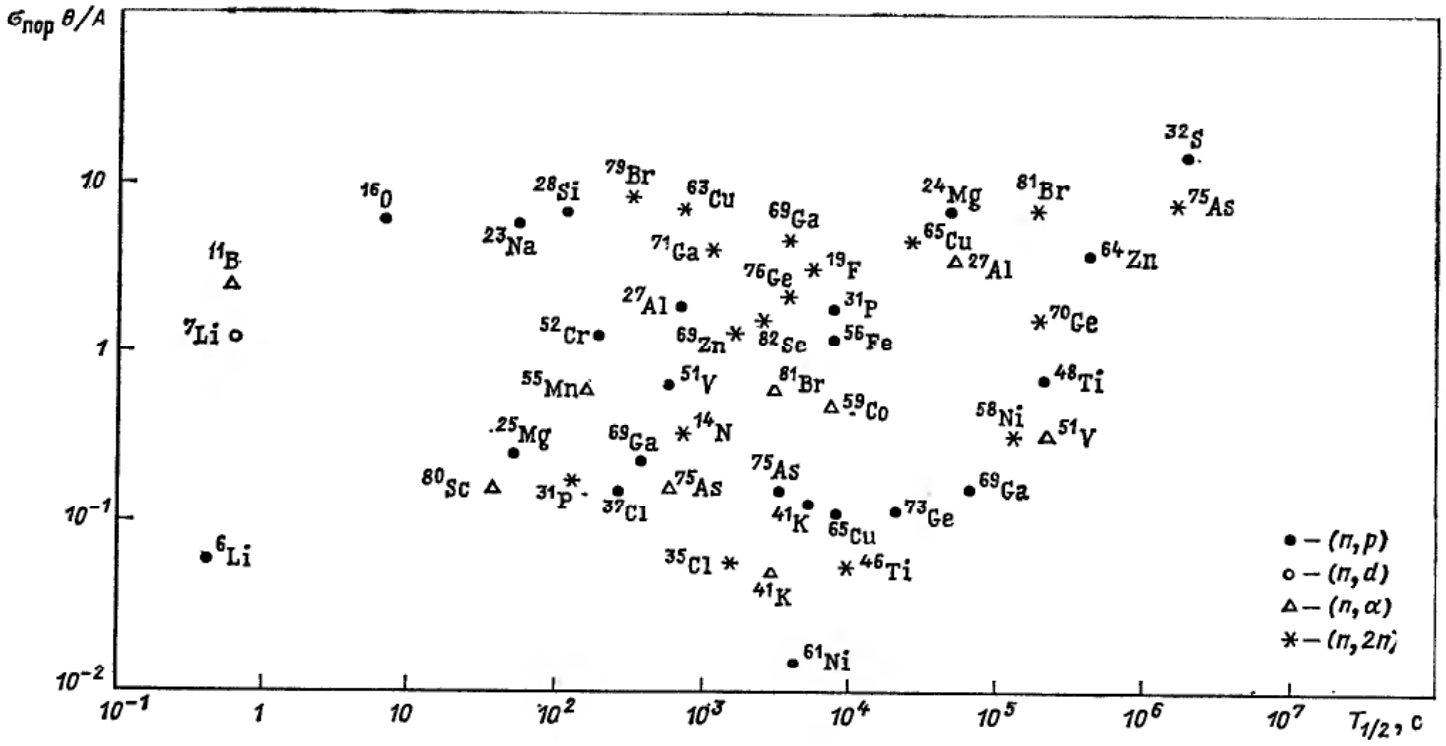


Рис. 41.39. Значения периода полураспада и величины $\sigma_{пор}\ \theta/A$ для пороговых ядерных реакций ($1 \leqslant A \leqslant 85$) [43]: $\sigma_{пор}$ — сечение пороговой ядерной реакции при энергии нейтрона 14 МэВ. 10^{-31} м²; θ — распространенность нуклида в относительных единицах

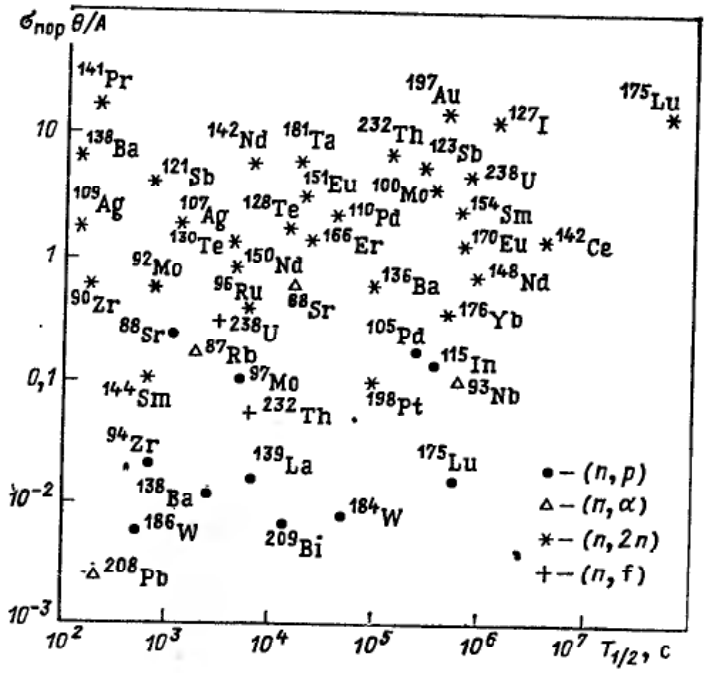


Рис. 41.40. Значения периода полураспада и величины $\sigma_{пор}\,\theta/A$ для пороговых ядерных реакций ($86 \leqslant A \leqslant 238$) [43]. Обозначения те же, что на рис. 40.39

41.13. ЗАМЕДЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ

В элементарной теории замедления предполагается, что замедление нейтронов происходит исключительно в результате упругих соударений с ядрами среды. При таких соударениях нейтрон теряет часть своей энергии, которая переходит в кинетическую энергию ядра отдачи. После соударения энергия рассеянного нейтрона в ЛСК определяется из соотношения [38]

$$E/E' = (1/2)\,[1 + \alpha + (1 - \alpha)\cos\theta],$$

$$\alpha = [(A-1)/(A+1)]^2,$$

где E' и E — энергия нейтрона до и после соударения; A — масса ядра-мишени; θ — угол рассеяния нейтрона в СЦМ.

Угол рассеяния в ЛСК φ (угол между векторами скоростей нейтрона до и после соударения) и угол рассеяния в СЦМ связаны соотношением

$$\cos\varphi = 1 + A\cos\theta \,/\, \sqrt{(1 + 2A\cos\theta + A^2)}.$$

Здесь и выше масса нейтрона принята равной единице.

При упругих соударениях энергия нейтронов изменяется в пределах от $\alpha E'$ до E'.

Средняя логарифмическая потеря энергии на одно соударение с ядром массой A определяется как

$$\xi = \overline{(\ln E' - \ln E)} = 1 + (A-1)^2/2A - \ln[(A-1)/(A+1)]$$

и не зависит от энергии. При $A \gg 1$ справедлива формула

$$1/\xi = A/2 + 1/3 + 1/18\,A.$$

При $A=2$ погрешность этой величины менее 1 % [37].

Среднее число соударений N, необходимое для того, чтобы нейтрон с начальной энергией E' замедлился до энергии E, определяется как

$$N = (1/\xi)\ln(E'/E).$$

В табл. 41.11 приведены значения среднего числа соударений, требующихся для замедления нейтрона от 2 МэВ до тепловой энергии (0,0253 эВ).

Таблица 41.11. **Свойства некоторых замедлителей [8]**

замедлитель	$1-\alpha$	ξ	$\overline{\cos\varphi}$	N	A
$^1_1$H	1,00	1,00	0,67	18,2	1
$^2_1$H	0,889	0,725	0,33	25,1	2
He	0,640	0,425	0,167	43	4
Li	0,438	0,268	0,095	68	7
Be	0,360	0,209	0,074	87	9
C	0,284	0,158	0,056	115	12
O	0,222	0,120	0,042	152	16
U	0,016	0,00838	0,0028	2172	238

Одной из величин, характеризующих меру распространения нейтронов в процессе замедления, является средний квадрат расстояния от источника, на котором нейтроны обладают энергией E. Средний квадрат перемещения при замедлении равен [38]

$$\overline{r^2} = \int r^2\, W(r, \tau)\, dr = 2n\tau,$$

где $W(r, \tau)$ — функция, определяющая нейтронное поле, которое возникло в бесконечной однородной среде от точечного источника моноэнергетических нейтронов, и являющаяся решением уравнения $\partial W(r, \tau)/\partial\tau = \Delta W(r, \tau)$ с начальным условием $W(r, 0) = \delta(r)$; $n = 1, 2, 3$ для источника в виде плоскости, нити и точки соответственно. Величину $\sqrt{\tau}$ называют длиной замедления, а τ — возрастом нейтронов. Значения τ экспериментально измеряют по активации детектора на различных расстояниях от источника. Обычно определяют τ с помощью детектора из ^{115}In, который имеет резонанс при $E = 1{,}46$ эВ.

Добавка $\Delta\tau$, связанная с замедлением нейтронов от 1.46 эВ до E_c, мала по сравнению с τ и может быть вычислена приближенно по формуле [38]:

$$\Delta\tau = \int_{E_c}^{1{,}46\ эВ} \frac{dE}{3\,\xi\,\Sigma_s\,\Sigma_{tr}\,E},$$

где Σ_{tr} — транспортное макроскопическое сечение, оно заменяет полное сечение при расчетах в транспортном приближении: $\Sigma_{tr} = \Sigma_{tot} + \Sigma_s\,(1 - \overline{\cos\varphi})$, $\overline{\cos\varphi}$ — средний косинус угла рассеяния в ЛСК.

Значение $\Delta\tau$, вычисленное по этой формуле, в той области, где необходимо учитывать влияние химических связей на процесс передачи энергии от нейтронов к ядрам замедлителя, меньше фактического. Возраст τ, см^2, для смеси легкого замедлителя с тяжелыми ядрами нельзя вычислять по приводимой формуле, поскольку в этом случае существенную роль играют неупругие столкновения и анизотропия рассеяния на тяжелых ядрах при больших энергиях.

Время замедления нейтрона до возраста τ определяется как

$$T(\tau) = \int_0^u T_s(u')\,\frac{du'}{\xi},$$

где $T_s(u)=1/v(u)\Sigma_s(u)$ — среднее время между двумя соударениями нейтрона; $du/\overline{\xi}$ — среднее число соударений на интервале замедления du. Поскольку для ядер с массовыми числами $A>1$ в области энергий до 100 кэВ $1/\Sigma_{tr}=\text{const}$, зависимость возраста нейтронов от энергии логарифмическая [13]:

$$\tau(E)=\frac{1}{3\xi\,\Sigma_{tr}\,\Sigma_s}\int_E^{E_0}\frac{dE'}{E'}=\frac{1}{3\,\xi\,\Sigma_{tr}\,\Sigma_s}\ln\frac{E_0}{E}.$$

Таблица 41.12 **Параметры, характеризующие свойства замедлителей [13]**

Замедлитель	τ, см² [38]	T, 10^{-5} с
H_2O	26,48 (32)	1
D_2O	111 (1)	5
C	282,5 (1,8)	15
Be	86,6 (2,4)	7
BeO	92,0 (1,5)	7,8

Таблица 41.13. **Возраст нейтронов для некоторых замедлителей [39]**

Замедлитель (плотность, г/см³)	τ, см²	Источник нейтронов (E_n, МэВ)	Детектор или $E_{гр}$, эВ
H_2O	5,48 (15)	Sb-γ-Be (0,025)	
	13,9 (2)	Na-γ-Be (0,970)	
	27,86 (1)	Co спектром деления	
	34,6 (2,2)	Реакция $D(d,n)$ (2,6)	In
	48,5	Ra-α-Be	
	57,3 (2,0)	Po-α-Be	
	150,0 (6,0)	Реакция $T(d,n)$ (14,1)	
	30,3 (1,5)	Co спектром деления	0,025
	55	Ra-α-Be	Dy
	62 (5)	Po-α-Be	0,025
50% H_2O+50% Al	76,8	Co спектром деления	In
50% H_2O+50% Zr	81,7	То же	0,025
50% H_2O+50% Pb	72,8	Ra-α-Be	In
50% H_2O+50% Fe	57,9	То же	
50% H_2O+50% Zr	92	Po-α-Be	0,025
D_2O	109 (3)	Co спектром деления	In
	120	То же	0,025
C	142—147	Sb-γ-Be (0,025)	
	312,5 (5)	Co спектром деления	In
	380	Ra-α-Be	
Be (1,85)	80,2 (2)	Co спектром деления	
Be (1,78)	120 (23)	Ra-α-Be	
Be (1,84)	97,2	Co спектром деления	0,025
BeO (2,96)	93,4 (4,7)	То же	In
BeO	105 (10)	»	0,025

Для источника нейтронов с $E_0\ll 100$ кэВ время замедления

$$T(E)=\frac{1}{\xi\,\Sigma_s}\int_E^{E_0}\frac{dE'}{v(E')\,E'}=\frac{2}{\xi\Sigma_s}\left(\frac{1}{v}-\frac{1}{v_0}\right).$$

Для малых энергий, т. е. $E\ll E_0$,

$$T(E)\approx 2/\xi v(E)\,\Sigma_s.$$

В табл. 41.12, 41.13 приведены значения возраста нейтронов от источника со спектром деления при их замедлении до резонансной энергии In (1,46 эВ) и значения τ для некоторых замедлителей.

41.14. ДИФФУЗИЯ НЕЙТРОНОВ

Длиной диффузии называется величина $L=\sqrt{D/\Sigma_a}$, см, где D — коэффициент диффузии, см; Σ_a — макроскопическое сечение поглощения, см$^{-1}$. Коэффициент диф-

Таблица 41.14. **Время жизни тепловых нейтронов [9]**

Замедлитель	Плотность, г/см³	Время жизни t_T, 10^{-4} с
H_2O	1,00	2,13
D_2O	1,10	1300
C	1,6	129
Be	1,85	36,5
BeO	2,96	76,0
Парафин	0,87	1,78
Органическое стекло	1,18	2,32
$ZrH_{1,7}$	3,48	2,66

Таблица 41.15. **Диффузионные характеристики некоторых веществ [38]**

Вещество	$1-\overline{\mu}$ [21]	ξ [21]	L, см	D, см
H_2O	—	—	2,69 (2)	0,1423 (19)
D_2O	—	—	147 (2)	0,84 (1)
Be	0,9259	0,209	24,4 (13)	0,487 (5)
BeO	—	—	36.5 (3)	0,627 (7)
C	0,9440	0,158	56,4 (6)	0,828 (8)
Na	0,9710	0,0845	17,7 (1)	3,755 (6)
Mg	0,9722	0,0811	30,4 (8)	2,229 (2)
Al	0,9754	0,0723	16,7 (1)	3,418 (7)
Ca [23]	0,9833	0,0492	21,8	4,87
Cd [23]	0,9940	0,0178	0,0949	1,03
Mn [23]	0,9878	0,0359	1,30	1,80
Fe	0,9881	0,0353	1,22 (1)	0,288 (1)
Co [23]	0,9887	0,0335	0,40	0,541
Cu [23]	0,9896	0,0309	1,30	0,552
Zr	0,9927	0,0218	13,1 (1)	1,195 (9)
Nb [23]	0,9928	0,0214	4,42	1,23
Mo [23]	0,9931	0,0207	2,08	0,749
Ag [23]	0,9938	0,0184	0,508	0,953
Pb	0,9968	0,0096	13,3 (1)	0,875 (16)
Bi	0,9968	0,0095	39,20 (24)	1,263 (5)
Th	—	0,0086	1,78 (1)	0,601 (4)
U	—	0,0084	1,20 (1)	0,453 (4)
Pu [23]	—	0,0083	0,0708	0,286

фузии D, см, связан с диффузионной постоянной D_0, см^2/с, соотношением $D_0 = Dv$, где v — скорость, см/с. Длина диффузии с точностью до числового множителя характеризует среднее расстояние между точкой рождения нейтрона и точкой, в которой он поглощается, т. е. $\overline{r^2} = 6L^2$, где r — расстояние по прямой от точки возникновения нейтрона до точки его захвата.

Величина t_T с, определяемая по формуле $t_T = 1/v\Sigma_a$, где v — скорость нейтрона, см/с, называется временем диффузии или временем жизни тепловых нейтронов (табл. 41.14).

Таблица 41.16. **Время термализации в некоторых замедлителях [40]**

Замедлитель	t_{th}, 10^{-6} с
H_2O (77 K)	55,5 (1,5)
H_2O (300 K)	5,8 (0,6)
C	185 (45)
Be	28
BeO	67

Значения длины диффузии L, коэффициента диффузии D, средней логарифмической потери энергии ξ и величины $1-\bar{\mu}$, где $\bar{\mu}$ — средний косинус угла рассеяния, для ряда элементов приведены в табл. 41.15.

Время термализации t_{th} (табл. 41.16) определяется как скорость приближения средней энергии нейтронов к равновесной, т. е.

$$\bar{E} - (2/3)\,kT = \text{const}\,\exp\,(-t/t_{th}).$$

В экспериментах с импульсными источниками нейтронов постоянная спада асимптотической плотности потока нейтронов связана с диффузионными свойствами среды и геометрическим параметром B^2, см$^{-2}$, соотношением

$$\lambda_0 = \overline{v\Sigma_a} + D_0 B^2 - CB^4 + FB^6,$$

где D — коэффициент диффузии, см; v — скорость нейтрона, см/с; $\overline{\Sigma}_a$ — макроскопическое сечение поглощения, см$^{-1}$; $D_0 = Dv$, см^2/с; C — коэффициент диффузионного охлаждения, см^4/с; F — числовой коэффициент, см^6/с.

Значения величин, характеризующих диффузионные свойства замедляющих нейтроны сред, приведены в табл. 41.17.

Таблица 41.17. **Диффузионные параметры замедлителей [41]**

Среда (удельная масса, г/см^3)	B^2, см$^{-2}$	λ_0, с$^{-1}$	L, см	D_0, 10^5 см^2/с	C, 10^4 см^4/с [F, см^6/с]
H_2O	0,02—0,42	—	2,80 (3)	0,368 (4)	0,4137 (688)
D_2O	—	—	—	1,96 (7)	3,72 (50)
C					
(1,70)	1,76—18,9	74,7 (0,6)	53,8 (3)	2,14 (1)	340 (30)
(1,64)	—	—	52,4 (1,4) [42]	2,086 (21) [42]	390 (25) [42]
Be					
(1,85)	3,4—74	277 (8)	20,8 (3)	1,235 (13)	28 (3)
(1,79)	—	—	21,8 (3) [42]	1,233 (7) [42]	31,3 (8) [42]
BeO					
(2,96)	—	132 (3)	29,9 (3)	1,178 (3)	38,5 (8)
(2,79)	—	—	28,9 (5) [42]	1,548 (9) [42]	46,3 (2,4) [42]
Zr [40]	—	3765 (89)	—	10,579 (32)	21,2 (3,5) [5300 (14)]
Бензол [40]	—	2886 (111)	—	0,4865 (137)	1,387 (385)
Парафин	—	5860 (70)	2,13 (4)	0,266 (5)	0,120 (50)
Полиэтилен	—	5900 (90)	2,12 (3)	0,265 (6)	0,260 (80)
Даутерм А (дифенил — 26,8%, оксидифенил — 73,2%)	—	2870 (40)	4,14 (7)	0,492 (6)	1,19 (21)
Органическое стекло	—	4300	—	0,34	—
$ZrH_{1,7}$	0,03—0,39	3757 (98)	—	0,579 (32)	21,2 (3,5) 50 (14)
Люсит	—	—	3,14 (3)	—	—
Дифенил ($T = 77°$ C)	0,0816—0,28	—	4,82 (7)	0,5437 (117)	0,985 (55)
n-Гептан ($T = 17,5°$ C)	0,11—1,5	4950 (120)	2,59 (6)	0,3313 (12)	0,480 (29)
Моноизопропилбифенил ($T = 30$ °C)	0,0945—0,2952	—	—	0,3780 (33)	0,125 (43)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ENDF-102.** Data Formates and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File, ENDF/Revised by D. Garber, C. Dunford, S. Pearlstein. BNL-NCS-50496. Upton, N. Y., 1975.

2. **Hawerton R. J., Plechaty E. F., Cullen D. E.** The LLL Evaluated Nuclear Data Library (ENDL): Evaluation Techniques, Graphical Displays and Descriptions of Individual Evaluations. UCRL-50400. Lawrence Livermore Laboratory. 1971. Vol. 4.

3. **Parker K.** The Aldermaston Nuclear Data Library as at May 1963. AWRE 0-70/63. Atomic Weapons Research Establishments. Aldermasten, England, 1963.

4. **Woll D.** Card Image Format of the Karlsruhe Evaluated Nuclear Data File KEDAK. Karlsruhe Report KFK

880. Institut für Angewandte Kernphysik Kernforschungszentrum. Karlsruhe, 1968.

5. **CINDA 84** (1981—1984). The index to literature and computer files on microscopic neutron data. Published on behalf of USA National Nuclear Data Center, USSR Nuclear Data Centre, NEA Data Bank, IAEA Nuclear Data Section. Vienna. IAEA, 1984.

6. **Радиационный захват нейтронов**: Справочник/ /Т. С. Беланова, А. В. Игнатюк, А. Б. Пащенко, В. И. Плякнн. М.: Энергоатомиздат, 1986.

7. **Блатт Дж., Вайскопф В.** Теоретическая ядерная физика: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.

8. **Кёртис Л.** Введение в нейтронную физику: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1965.

9. **Бекурц К., Виртц К.** Нейтронная физика: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1968.

10. **Ситенко А. Г.** Теория ядерных реакций: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1983.

11. **Александров Ю. А.** Фундаментальные свойства нейтронов. — 2-е изд. М.: Энергоиздат, 1982.

12. **Вейнберг А., Вигнер Е.** Физическая теория ядерных реакторов: Пер. с англ. М.: Изд-во ннострл лнт., 1961.

13. **Фейнберг С. М., Шихов С. Б., Троянский В. Б.** Теория ядерных реакторов: Учебник для вузов. М.: Атомиздат, 1980. Т. 1: Элементарная теория реакторов.

14. **Вычислительные методы в физике реакторов:** Сб. статей/Под ред. Х. Гринспена, К. Келбера, Д. Окрента: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1972.

15. **Николаев М. Н., Базазянц Н. О.** Анизотропня упругого рассеяния нейтронов. М.: Атомиздат, 1972.

16. **Анципов Г. В., Коньшин В. А., Суховицкий Е. Ш.** Ядерные константы для изотопов плутония. Минск: Наука и техника, 1982.

17. **Обозначения,** единицы измерений и терминология в физике, документ UIP (1978)//Успехи фнз. наук. 1979. Т. 129, вып. 2. С. 289—338.

18. **Partical** Data Group. Review of Particle Properties//Rev. Mod. Phys. 1984. Vol. 56, N 2. Pt II. P. S122—S123.

19. **Neutron** Physics. Springer Tracts in Modern Physics. Berlin: Springer-Verlag, 1977. Vol. 80, N 1.

20. **Медведев Ю. А., Степанов Б. М., Труханоя Г. Я.** Ядерно-фнзические константы взаимодействия с элементами, входящими в состав атмосферы и земной коры: Справочник: М.: Энергоиздат, 1981.

21. **Mughabghab S. F., Divadeenam M., Holden W. E.** Neutron Cross Sections. N. Y.: Academic Press, 1981. Vol. 1: Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Secitons. P. A., $Z=1\div60$.

22. **Nuclear** Wallet Cards/Ed. by V. S. Shirley, C. M. Lederer. N. Y: NBS, Office of Standord Reference Data, 1979.

23. **Гордеев И. В., Кардашев Д. А., Малышев А. В.** Ядерно-физические константы: Справочник. М.: Атомиздат, 1963.

24. **Mughabghab S. F., Garder D. I.** Neutron Gross Sections. — 3rd ed. National Neutron Cross Section Cener. BNL-325. Brookhaven National Laboratory Associated Universities, Inc., 1973. Vol. 1: Resonance Parameters

25. **Оцененные** нейтронные данные для расчета тепловых реакторов/Л. П. Абагян, М. С. Юдкевич//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы М.: ЦНИИатоминформ, 1981. Вып. 4(43). С. 24—52.

26. **Горбачев В. М., Замятнин Ю. С., Лбов А. А.** Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деленне ядер: Справочник. М.: Атомиздат, 1976.

27. **Nuclear** Data Standards for Nuclear Measurements: Technical report series N 227. Vienna: IAEA, 1983.

28. **Gryntakis E. M., Kim J. I.//J.** Radioanal. Chem. 1983. Vol. 76, N 2. P. 341—496.

29. **Garber D. I., Kinsey R. R.** Neutron Gross Sections. Curvers — 3d. ed. National Neutron Cross Section Center. BNL-325, Brookhaven National Laboratory Associated Universities, Inc., 1976. Vol. 2.

30. **Сечения** пороговых реакций, вызываемых нейтронами: Справочнпк/В. М. Бычков, В Н. Манохин, А Б. Пащенко, В. И. Пляскин. М.: Энергоиздат, 1982.

31. **Tsukada K.** Table of Nuclear Reactions and Subsequent Radioactive Decays Induced by 14-MeV Neutrone. JAERI 1252. Japan Atomic Energy Research Institute, 1977.

32. **Лапенас А. А.** Измерение спектров нейтронов активационным методом. Рига: Зинатне, 1975.

33. **Ломакин С. С., Петров В. И., Самойлов П. С.** Радиометрия нейтронов активационным методом. М.: Энергоатомиздат, 1983.

34. **Крамер-Агеев Е. А., Трошин В. С., Тихонов Е. Г.** Активационные методы спектрометрни нейтронов. М.: Атомиздат, 1976.

35. **О выборе** оптимального набора активацнонных детекторов для спектрометрии нейтронов в сборках с внешним источнпком 14-МэВ-нейтронов/Х. И. Бондарс, В. А. Загрядский, В. М. Новиков, Д. Ю. Чувилин. Препринт ИАЭ-3798/4. М., 1983.

36. **Handbook** of Nuclear Activation Cross Sections: Technical reports series N 156. Vienna: IAEA, 1974.

37. **Усачев Л. Н., Бобков Ю. Г.** Теория возмущений и планирование эксперимента в проблеме ядерных данных для реакторов. М.: Атомиздат, 1980.

38. **Галанин А. Д.** Введение в теорню ядериых реакторов на тепловых нейтронах: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984.

39. **Таблицы** физических величин: Справочник/Под. ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.

40. **Спектры** медленных нейтронов: Сб. статей: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1971.

41. **Импульсный метод в нейтронной** физике/Под. ред. П. Гриблера, Э. Хенли: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1968.

42. **Жежерун И. Ф.** Экспериментальное изучение некоторых вопросов физики ядерных реакторов с кристаллическими замедлителями: Автореф. днс. .... д-ра физ.-мат. наук., 1974.

43. **Barbier M.** Induced Radioactivity. Amsterdam — Lond.: North-Holland Publ. Comp., 1969.

44. **Handbook** on Nuclear Activation Data. Technical report series № 273. Vienna: IAEA, 1987.

Глава 42

ПРОХОЖДЕНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

В. П. Рудаков

42.1. ПРОХОЖДЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Тяжелые (тяжелее электрона) заряженные частицы, проходя через вещество, теряют энергию главным образом на ионизацию и возбуждение атомов вещества. Характеристикой потери энергии является удельная потеря энергии dE/dx, МэВ/см, или $(1/\rho)\ dE/dx$, МэВ/(мг·см$^{-2}$), где ρ — плотность вещества, мг/см^3. Удельные потери энергии называют также тормозной способностью вещества.

Тормозную способность вычисляют по формуле Бете:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi e^4 Z z^2 n}{m_e v^2}\left[\ln\frac{2m_e v^2 Q_{\max}}{J^2(1-\beta^2)} - 2\beta^2 - \delta - U\right],$$

где e и m_e — заряд и масса электрона; n — число атомов в 1 см^3 вещества и Z — его атомный номер; v и z — скорость и заряд падающей частицы; $\beta = v/c$ (c — скорость света); J — средний потенциал ионизации атома вещества; $Q_{\max}$ — максимальная энергия, передаваемая частицей атомному электрону; U — поправка, учитывающая энергию связи электронов на K- и L-оболочках атомов; δ — поправка, связанная с так называемым эффектом плотности. В диапазоне энергии падающих частиц 1—100 МэВ поправками U и δ можно пренебречь.

Пробег R частицы с начальной энергией E описывается формулой $R = \int_0^E \frac{dE}{dE/dx}$; единица пробега — см или мг/см^2.

Поскольку тяжелая заряженная частица с энергией 1—100 МэВ в каждом акте взаимодействия с атомными электронами теряет лишь малую долю своей энергии, пучок моноэнергетических заряженных частиц, проходя через вещество, практически не меняет интенсивность вплоть до конца пробега. Статистические флуктуации потерь энергии приводят лишь к небольшому (1—2%) разбросу пробегов (стреглингу). Выход тяжелых заряженных частиц из пучка в результате многократного рассеяния оценивается по формулам, приведенным ниже.

Из формулы Бете видно, что тормозная способность какого-либо вещества для данной частицы зависит лишь от заряда и скорости этой частицы. Поэтому, зная, например, пробег протона, можно вычислить пробеги дейтронов и тритонов в этом же веществе по формуле

$$R_m(E) = \frac{m}{m_p} R_p\left(\frac{m_p}{m} E\right),$$

где R_p, m_p и $\frac{m_p}{m} E$ — пробег, масса и энергия протона соответственно; R_m, m и E — пробег, масса и энергия дейтрона или тритона. Точно так же, зная пробег α-частицы, можно по этой формуле вычислить пробег ионов $^3He^+$ и т. д.

Кроме того, зная пробег какой-либо одной частицы с зарядом z и массой m, можно приближенно вычислить пробег любой другой частицы с зарядом z_1 и массой m_1, по формуле

$$R_{m_1}(E) = \frac{m_1}{m}\frac{z^2}{z_1^2} R_m\left(\frac{m}{m_1} E\right) F,$$

где E и $\frac{m}{m_1} E$ — энергии частиц m_1 и m; F — поправочный множитель, заметно отличающийся от единицы лишь при больших энергиях. Эта формула не учитывает процессов перезарядки при малых энергиях и поэтому справедлива при энергиях выше 5 МэВ.

В табл. 42.1—42.20 приведены значения пробега и тормозной способности для ионов начала периодической системы (от водорода до неона), наиболее часто встречающихся как ускоренные частицы и как продукты ядерных реакций в некоторых веществах. Более полные таблицы пробегов опубликованы в [1—3].

Таблица 42.1. **Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см$^{-2}$), для ионов водорода $^{1}_{1}H^{+}$ [1]**

E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,348	0,288	0,211	0,140	0,114	0,103	0,096	0,089	0,056	0,048	0,044	0,038	0,0126
0,0160	0,394	0,326	0,239	0,159	0,129	0,117	0,108	0,100	0,064	0,055	0,050	0,043	0,0161
0,0200	0,441	0,364	0,267	0,178	0,144	0,131	0,121	0,112	0,071	0,061	0,056	0,048	0,0202
0,0250	0,497	0,411	0,301	0,200	0,163	0,148	0,137	0,126	0,080	0,069	0,063	0,054	0,0252
0,0320	0,559	0,463	0,339	0,225	0,183	0,167	0,154	0,142	0,091	0,078	0,072	0,061	0,0322
0,0400	0,611	0,509	0,371	0,248	0,202	0,184	0,170	0,157	0,100	0,086	0,079	0,068	0,0403
0,0500	0,655	0,549	0,400	0,268	0,220	0,200	0,184	0,171	0,108	0,094	0,087	0,075	0,0504
0,0600	0,683	0,578	0,419	0,282	0,232	0,211	0,195	0,180	0,116	0,101	0,093	0,080	0,0605
0,0700	0,699	0,598	0,430	0,292	0,241	0,219	0,202	0,188	0,121	0,105	0,098	0,084	0,0705
0,0800	0,707	0,613	0,437	0,298	0,247	0,224	0,207	0,192	0,125	0,109	0,101	0,087	0,0806
0,0900	0,709	0,622	0,440	0,303	0,251	0,228	0,210	0,195	0,128	0,112	0,104	0,090	0,0907
0,1000	0,706	0,628	0,440	0,305	0,253	0,230	0,211	0,198	0,130	0,114	0,106	0,091	0,1008
0,1250	0,688	0,635	0,433	0,305	0,255	0,231	0,212	0,199	0,133	0,116	0,109	0,094	0,1260
0,1600	0,651	0,632	0,415	0,297	0,250	0,226	0,208	0,195	0,133	0,117	0,109	0,095	0,1612
0,2000	0,605	0,614	0,391	0,284	0,240	0,218	0,200	0,187	0,130	0,114	0,107	0,094	0,2016
0,2500	0,551	0,580	0,362	0,268	0,227	0,206	0,189	0,177	0,125	0,110	0,104	0,090	0,2519
0,3200	0,488	0,530	0,327	0,246	0,210	0,192	0,175	0,164	0,117	0,104	0,098	0,086	0,3225
0,4000	0,431	0,478	0,295	0,225	0,193	0,177	0,161	0,151	0,110	0,098	0,092	0,080	0,4031
0,5000	0,376	0,423	0,263	0,203	0,176	0,162	0,147	0,137	0,102	0,090	0,085	0,075	0,5039
0,6000	0,331	0,373	0,236	0,185	0,161	0,148	0,135	0,125	0,094	0,084	0,079	0,070	0,6047
0,7000	0,298	0,334	0,216	0,170	0,149	0,137	0,124	0,116	0,088	0,078	0,074	0,066	0,7055
0,8000	0,271	0,302	0,199	0,159	0,139	0,129	0,117	0,109	0,082	0,074	0,070	0,062	0,8062
0,9000	0,249	0,275	0,186	0,149	0,131	0,122	0,110	0,102	0,078	0,071	0,067	0,059	0,9070
1,0000	0,231	0,253	0,174	0,141	0,124	0,115	0,104	0,097	0,075	0,067	0,064	0,057	1,0078
1,2500	0,196	0,210	0,151	0,124	0,111	0,103	0,093	0,086	0,068	0,061	0,058	0,052	1,2597
1,6000	0,163	0,171	0,129	0,108	0,096	0,090	0,081	0,075	0,060	0,054	0,051	0,046	1,6125
2,0000	0,138	0,144	0,111	0,094	0,084	0,079	0,071	0,066	0,053	0,049	0,046	0,041	2,0156
2,5000	0,115	0,121	0,095	0,082	0,074	0,069	0,062	0,058	0,047	0,043	0,041	0,037	2,5195
3,2000	0,095	0,100	0,079	0,069	0,063	0,059	0,053	0,049	0,041	0,038	0,036	0,032	3,2250
4,0000	0,079	0,084	0,067	0,059	0,054	0,051	0,046	0,043	0,036	0,033	0,031	0,029	4,0312
5,0000	0,066	0,071	0,057	0,051	0,047	0,044	0,040	0,037	0,031	0,029	0,028	0,025	5,0395
6,0000	0,057	0,061	0,050	0,045	0,041	0,039	0,035	0,032	0,028	0,026	0,025	0,023	6,0468
7,0000	0,050	0,054	0,044	0,040	0,037	0,035	0,032	0,029	0,025	0,023	0,022	0,021	7,0546
8,0000	0,045	0,049	0,040	0,036	0,034	0,032	0,029	0,027	0,023	0,021	0,021	0,019	8,0624
9,0000	0,044	0,045	0,037	0,033	0,031	0,029	0,027	0,025	0,022	0,020	0,019	0,018	9,0702
10,0000	0,038	0,041	0,034	0,031	0,029	0,027	0,025	0,023	0,020	0,019	0,018	0,017	10,078
11,0000	0,035	0,038	0,032	0,029	0,027	0,025	0,023	0,022	0,019	0,018	0,017	0,016	11,086
12,0000	0,033	0,036	0,030	0,027	0,025	0,024	0,022	0,020	0,018	0,017	0,016	0,015	12,094

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	0,792	0,338	0,224	0,210	0,187	0,123	0,076	0,054	0,035	0,283	0,360	0,275	0,0126
0,0160	0,879	0,371	0,249	0,234	0,208	0,141	0,087	0,062	0,041	0,318	0,405	0,306	0,0161
0,0200	0,956	0,392	0,272	0,256	0,229	0,159	0,099	0,072	0,048	0,353	0,449	0,333	0,0202
0,0250	1,048	0,416	0,299	0,282	0,255	0,183	0,117	0,085	0,062	0,394	0,502	0,367	0,0252
0,0320	1,156	0,439	0,325	0,309	0,283	0,212	0,138	0,104	0,072	0,441	0,562	0,403	0,0322
0,0400	1,244	0,452	0,347	0,334	0,307	0,240	0,159	0,122	0,087	0,481	0,614	0,435	0,0403
0,0500	1,329	0,466	0,368	0,358	0,333	0,268	0,181	0,141	0,102	0,518	0,660	0,465	0,0504
0,0600	1,399	0,479	0,388	0,375	0,355	0,292	0,198	0,156	0,115	0,545	0,696	0,489	0,0605
0,0700	1,459	0,494	0,405	0,393	0,373	0,311	0,212	0,168	0,124	0,566	0,721	0,511	0,0705
0,0800	1,516	0,509	0,420	0,408	0,388	0,326	0,224	0,178	0,132	0,582	0,742	0,531	0,0806
0,0900	1,561	0,524	0,433	0,422	0,402	0,339	0,233	0,186	0,138	0,595	0,756	0,549	0,0907
0,1000	1,610	0,540	0,448	0,434	0,413	0,350	0,242	0,192	0,143	0,604	0,768	0,565	0,1008
0,1250	1,719	0,574	0,474	0,457	0,436	0,368	0,254	0,202	0,150	0,621	0,790	0,597	0,1260
0,1600	1,837	0,613	0,503	0,484	0,460	0,383	0,263	0,209	0,155	0,633	0,805	0,635	0,1612
0,2000	1,919	0,637	0,522	0,501	0,474	0,385	0,262	0,208	0,154	0,631	0,800	0,658	0,2016
0,2500	1,962	0,649	0,527	0,507	0,473	0,374	0,253	0,198	0,146	0,613	0,777	0,669	0,2519
0,3200	1,943	0,634	0,516	0,492	0,450	0,345	0,230	0,180	0,131	0,576	0,732	0,654	0,3225
0,4000	1,839	0,607	0,482	0,458	0,415	0,310	0,205	0,159	0,116	0,528	0,673	0,612	0,4031
0,5000	1,678	0,558	0,433	0,412	0,369	0,271	0,179	0,140	0,102	0,472	0,602	0,553	0,5039
0,6000	1,501	0,503	0,381	0,362	0,324	0,237	0,157	0,122	0,090	0,416	0,534	0,488	0,6047

E_m, МэВ/а. е. м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,7000	1,325	0,455	0,335	0,318	0,285	0,208	0,139	0,108	0,080	0,370	0,475	0,430	0,7055
0,8000	1,169	0,410	0,297	0,283	0,253	0,185	0,125	0,098	0,073	0,331	0,426	0,381	0,8062
0,9000	1,039	0,370	0,265	0,253	0,225	0,166	0,113	0,089	0,066	0,300	0,384	0,340	0,9070
1,0000	0,938	0,339	0,242	0,230	0,205	0,152	0,104	0,083	0,062	0,274	0,351	0,308	1,0078
1,2500	0,753	0,282	0,201	0,192	0,170	0,128	0,090	0,072	0,055	0,227	0,288	0,254	1,2597
1,6000	0,583	0,228	0,165	0,158	0,141	0,108	0,077	0,063	0,049	0,184	0,230	0,205	1,6125
2,0000	0,460	0,188	0,140	0,133	0,120	0,093	0,068	0,056	0,044	0,153	0,189	0,169	2,0156
2,5000	0,359	0,154	0,118	0,112	0,103	0,082	0,061	0,051	0,040	0,128	0,155	0,140	2,5195
3,2000	0,278	0,124	0,098	0,094	0,087	0,070	0,053	0,045	0,036	0,105	0,125	0,114	3,2250
4,0000	0,223	0,101	0,082	0,079	0,074	0,061	0,047	0,039	0,032	0,088	0,104	0,095	4,0312
5,0000	0,182	0,083	0,069	0,067	0,063	0,052	0,040	0,034	0,028	0,074	0,087	0,079	5,0390
6,0000	0,155	0,071	0,060	0,058	0,055	0,046	0,036	0,030	0,025	0,064	0,075	0,069	6,0468
7,0000	0,137	0,062	0,053	0,051	0,049	0,041	0,032	0,027	0,023	0,057	0,066	0,061	7,0546
8,0000	0,122	0,055	0,048	0,046	0,044	0,037	0,029	0,025	0,021	0,051	0,060	0,055	8,0624
9,0000	0,111	0,050	0,044	0,042	0,040	0,034	0,027	0,023	0,019	0,047	0,054	0,050	9,0702
10,0000	0,102	0,046	0,040	0,039	0,037	0,031	0,025	0,021	0,018	0,043	0,050	0,046	10,078
11,0000	0,094	0,043	0,038	0,036	0,034	0,029	0,023	0,020	0,017	0,040	0,046	0,043	11,086
12,0000	0,087	0,040	0,035	0,034	0,032	0,027	0,022	0,019	0,016	0,037	0,043	0,040	12,094

Таблица 42.2. **Пробег R, мг/см², ионов водорода $^1_1H^+$ в различных веществах [1]**
E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а. е. м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,059	0,070	0,102	0,158	0,193	0,216	0,231	0,246	0,373	0,421	0,449	0,491	0,0126
0,0160	0,068	0,082	0,118	0,181	0,222	0,247	0,265	0,283	0,430	0,488	0,521	0,575	0,0161
0,0200	0,078	0,093	0,134	0,205	0,251	0,279	0,300	0,320	0,489	0,556	0,595	0,661	0,0202
0,0250	0,089	0,106	0,151	0,231	0,283	0,315	0,338	0,362	0,554	0,632	0,678	0,757	0,0252
0,0320	0,102	0,122	0,173	0,264	0,323	0,360	0,386	0,414	0,635	0,727	0,781	0,877	0,0322
0,0400	0,116	0,139	0,196	0,298	0,365	0,406	0,436	0,468	0,719	0,824	0,886	0,999	0,0403
0,0500	0,132	0,158	0,222	0,337	0,413	0,458	0,493	0,529	0,815	0,935	1,006	1,139	0,0504
0,0600	0,147	0,175	0,246	0,374	0,458	0,507	0,546	0,586	0,905	1,038	1,117	1,268	0,0605
0,0700	0,161	0,193	0,270	0,409	0,500	0,554	0,597	0,641	0,990	1,136	1,223	1,391	0,0705
0,0800	0,175	0,209	0,293	0,443	0,541	0,600	0,646	0,694	1,072	1,230	1,324	1,509	0,0806
0,0900	0,190	0,226	0,316	0,476	0,582	0,644	0,694	0,746	1,152	1,321	1,423	1,623	0,0907
0,1000	0,204	0,242	0,339	0,510	0,622	0,688	0,742	0,797	1,230	1,410	1,519	1,734	0,1008
0,1250	0,240	0,281	0,397	0,592	0,721	0,798	0,861	0,924	1,421	1,629	1,754	2,006	0,1260
0,1600	0,293	0,337	0,480	0,709	0,861	0,952	1,029	1,103	1,686	1,931	2,077	2,378	0,1612
0,2000	0,357	0,402	0,580	0,848	1,025	1,133	1,227	1,314	1,993	2,280	2,448	2,804	0,2016
0,2500	0,444	0,486	0,714	1,031	1,241	1,371	1,486	1,591	2,389	2,728	2,926	3,351	0,2519
0,3200	0,580	0,614	0,919	1,306	1,564	1,726	1,874	2,006	2,973	3,387	3,628	4,151	0,3225
0,4000	0,756	0,774	1,179	1,649	1,964	2,164	2,355	2,520	3,685	4,188	4,481	5,122	0,4031
0,5000	1,007	0,998	1,542	2,122	2,511	2,761	3,010	3,222	4,642	5,262	5,624	6,422	0,5039
0,6000	1,293	1,253	1,947	2,642	3,110	3,412	3,727	3,992	5,676	6,421	6,855	7,814	0,6047
0,7000	1,615	1,539	2,394	3,210	3,761	4,119	4,506	4,828	6,789	7,666	8,174	9,301	0,7055
0,8000	1,971	1,857	2,881	3,824	4,461	4,877	5,344	5,726	7,976	8,990	9,577	10,881	0,8062
0,9000	2,359	2,207	3,405	4,480	5,207	5,682	6,235	6,684	9,230	10,385	11,054	12,541	0,9070
1,0000	2,780	2,589	3,967	5,177	5,997	6,533	7,178	7,697	10,546	11,848	12,602	14,275	1,0078
1,2500	3,967	3,685	5,524	7,088	8,153	8,851	9,746	10,461	14,095	15,789	16,769	18,935	1,2597
1,6000	5,944	5,552	8,056	10,148	11,584	12,529	13,827	14,869	19,647	21,933	23,269	26,189	1,6125
2,0000	8,643	8,132	11,435	14,165	16,068	17,317	19,155	20,629	26,796	29,798	31,589	35,443	2,0156
2,5000	12,661	11,975	16,361	19,938	22,471	24,137	26,772	28,843	36,865	40,850	43,256	48,349	2,5195
3,2000	19,456	18,433	24,518	29,373	32,867	35,196	39,120	42,169	52,948	58,480	61,830	68,810	3,2250
4,0000	28,827	27,268	35,569	42,008	46,704	49,898	55,475	59,875	74,010	81,494	86,028	95,428	4,0312
5,0000	42,846	40,387	51,855	60,461	66,794	71,210	79,124	85,476	104,075	114,385	120,447	133,199	5,0390
6,0000	59,307	55,720	70,767	81,732	89,870	95,609	106,176	114,724	138,207	151,568	159,272	175,591	6,0468
7,0000	78,125	73,180	92,199	105,704	115,830	122,961	136,444	147,441	176,200	192,816	202,300	222,377	7,0546
8,0000	99,234	92,701	116,062	132,276	144,562	153,185	169,769	183,485	217,769	237,963	249,315	273,414	8,0624
9,0000	122,542	114,237	142,282	161,361	175,962	186,185	206,058	222,734	262,856	286,831	300,174	328,493	9,0702
10,0000	147,989	137,754	170,795	192,866	209,966	221,870	245,277	265,037	311,387	339,290	354,688	387,461	10,078
11,0000	175,544	163,200	201,546	226,713	246,486	260,164	287,342	310,256	363,240	395,146	412,594	450,213	11,086
12,0000	205,152	190,534	234,483	262,868	285,442	300,978	332,155	358,304	418,272	454,277	473,872	516,684	12,094

E_m, МэВ/а. е. м	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	0,022	0,056	0,089	0,095	0,109	0,174	0,292	0,403	0,562	0,068	0,052	0,067	0,0126
0,0160	0,026	0,065	0,104	0,111	0,126	0,200	0,334	0,463	0,651	0,080	0,061	0,079	0,0161
0,0200	0,030	0,076	0,119	0,127	0,144	0,227	0,377	0,522	0,739	0,092	0,070	0,091	0,0202
0,0250	0,035	0,088	0,136	0,146	0,165	0,256	0,423	0,585	0,829	0,105	0,081	0,105	0,0252
0,0320	0,041	0,104	0,159	0,169	0,191	0,292	0,478	0,659	0,933	0,122	0,094	0,123	0,0322
0,0400	0,048	0,122	0,182	0,194	0,218	0,327	0,533	0,730	1,033	0,139	0,107	0,142	0,0403
0,0500	0,056	0,144	0,210	0,223	0,249	0,367	0,592	0,807	1,139	0,159	0,123	0,164	0,0504
0,0600	0,063	0,166	0,237	0,251	0,279	0,403	0,645	0,875	1,232	0,178	0,138	0,185	0,0605
0,0700	0,070	0,186	0,263	0,277	0,306	0,436	0,694	0,937	1,316	0,196	0,152	0,206	0,0705
0,0800	0,077	0,206	0,287	0,302	0,333	0,468	0,740	0,995	1,394	0,214	0,166	0,225	0,0806
0,0900	0,083	0,226	0,311	0,326	0,358	0,498	0,784	1,050	1,469	0,231	0,179	0,244	0,0907
0,1000	0,090	0,245	0,333	0,350	0,383	0,527	0,827	1,103	1,541	0,248	0,193	0,262	0,1008
0,1250	0,105	0,290	0,388	0,406	0,442	0,597	0,928	1,231	1,712	0,289	0,225	0,305	0,1260
0,1600	0,125	0,349	0,460	0,481	0,521	0,691	1,065	1,402	1,943	0,345	0,269	0,362	0,1612
0,2000	0,146	0,414	0,539	0,563	0,607	0,796	1,219	1,596	2,204	0,409	0,319	0,424	0,2016
0,2500	0,172	0,492	0,635	0,663	0,714	0,929	1,414	1,844	2,541	0,490	0,383	0,500	0,2519
0,3200	0,208	0,602	0,770	0,804	0,867	1,125	1,707	2,218	3,051	0,609	0,477	0,607	0,3225
0,4000	0,251	0,732	0,932	0,974	1,053	1,372	2,079	2,695	3,706	0,755	0,592	0,735	0,4031
0,5000	0,308	0,906	1,153	1,206	1,311	1,721	2,606	3,372	4,635	0,957	0,750	0,908	0,5039
0,6000	0,372	1,096	1,402	1,468	1,604	2,120	3,209	4,144	5,692	1,185	0,928	1,103	0,6047
0,7000	0,444	1,307	1,684	1,765	1,936	2,575	3,892	5,021	6,885	1,442	1,129	1,323	0,7055
0,8000	0,525	1,540	2,004	2,101	2,312	3,089	4,657	6,002	8,209	1,730	1,353	1,572	0,8062
0,9000	0,616	1,799	2,364	2,479	2,736	3,665	5,505	7,082	9,662	2,050	1,602	1,852	0,9070
1,0000	0,718	2,084	2,762	2,897	3,206	4,301	6,433	8,251	11,237	2,403	1,877	2,164	1,0078
1,2500	1,019	2,902	3,909	4,102	4,560	6,119	9,045	11,508	15,585	3,418	2,673	3,067	1,2597
1,6000	1,554	4,298	5,856	6,140	6,845	9,138	13,298	16,756	22,446	5,153	4,050	4,620	1,6125
2,0000	2,336	6,248	8,522	8,934	9,948	13,167	18,863	23,567	31,173	7,563	5,992	6,792	2,0156
2,5000	3,582	9,216	12,465	13,075	14,479	18,947	26,709	33,053	43,166	11,178	8,953	10,083	2,5195
3,2000	5,827	14,351	19,060	19,995	21,953	28,283	39,129	47,972	61,844	17,293	14,045	15,702	3,2250
4,0000	9,081	21,609	28,071	29,413	32,030	40,662	55,340	67,335	85,883	25,701	21,140	23,481	4,0312
5,0000	14,110	32,706	41,483	43,369	46,857	58,666	78,649	94,977	119,798	38,231	31,808	35,137	5,0390
6,0000	20,125	45,939	57,172	59,674	64,112	79,413	105,264	126,386	157,996	52,904	44,359	48,838	6,0468
7,0000	27,062	61,206	75,032	78,221	83,712	102,808	135,109	161,429	200,471	69,628	58,705	64,477	7,0546
8,0000	34,874	78,444	94,976	88,900	105,595	128,788	168,137	200,041	247,074	88,323	74,781	81,953	8,0624
9,0000	43,542	97,563	116,955	121,671	129,683	157,304	204,352	242,228	297,738	108,953	92,552	101,233	9,0702
10,0000	53,047	118,429	140,896	146,465	155,891	188,297	243,626	287,921	352,412	131,476	111,983	122,269	10,078
11,0000	63,367	140,982	166,715	173,205	184,154	221,721	285,865	337,042	411,094	155,833	133,023	144,996	11,086
12,0000	74,495	165,192	194,371	201,846	214,428	257,523	330,985	389,490	473,713	181,985	155,646	169,377	12,094

Таблица 42.3. Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см$^{-2}$), для ионов гелия $^4_2He^+$ [1]

E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а. е. м	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,877	0,726	0,532	0,354	0,287	0,261	0,241	0,223	0,142	0,121	0,112	0,096	0,0500
0,0160	0,993	0,821	0,602	0,400	0,325	0,295	0,273	0,253	0,161	0,137	0,126	0,108	0,0640
0,0200	1,110	0,918	0,673	0,447	0,363	0,330	0,305	0,282	0,180	0,154	0,141	0,121	0,0801
0,0250	1,241	1,026	0,752	0,500	0,406	0,368	0,341	0,316	0,201	0,172	0,158	0,135	0,1001
0,0320	1,403	1,163	0,852	0,566	0,461	0,419	0,387	0,358	0,227	0,195	0,180	0,154	0,1281
0,0400	1,554	1,294	0,945	0,631	0,514	0,469	0,432	0,400	0,254	0,219	0,201	0,173	0,1601
0,0500	1,704	1,428	1,040	0,697	0,571	0,520	0,479	0,444	0,282	0,245	0,226	0,194	0,2001
0,0600	1,819	1,539	1,115	0,751	0,617	0,561	0,518	0,480	0,308	0,267	0,247	0,212	0,2402
0,0700	1,906	1,631	1,173	0,795	0,657	0,596	0,551	0,511	0,328	0,287	0,266	0,229	0,2802
0,0800	1,972	1,709	1,219	0,832	0,689	0,624	0,576	0,536	0,347	0,305	0,282	0,243	0,3202
0,0900	2,020	1,773	1,254	0,863	0,715	0,649	0,598	0,557	0,365	0,319	0,296	0,255	0,3602
0,1000	2,054	1,827	1,280	0,887	0,737	0,668	0,614	0,575	0,379	0,332	0,307	0,265	0,4003
0,1250	2,094	1,932	1,317	0,927	0,774	0,702	0,645	0,604	0,405	0,354	0,331	0,286	0,5003
0,1600	2,077	2,018	1,323	0,948	0,797	0,723	0,663	0,622	0,424	0,372	0,349	0,304	0,6404
0,2000	2,010	2,040	1,299	0,944	0,799	0,723	0,664	0,622	0,431	0,380	0,357	0,312	0,8005
0,2500	1,901	1,999	1,248	0,922	0,784	0,711	0,651	0,610	0,431	0,381	0,357	0,312	1,0007

E_m, МэВ/а. е. м	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,3200	1,745	1,896	1,170	0,881	0,752	0,686	0,626	0,585	0,419	0,372	0,349	0,307	1,2808
0,4000	1,587	1,762	1,086	0,827	0,712	0,651	0,594	0,555	0,404	0,359	0,338	0,296	1,6010
0,5000	1,424	1,601	0,996	0,770	0,667	0,613	0,558	0,520	0,384	0,343	0,322	0,284	2,0013
0,6000	1,268	1,428	0,904	0,708	0,617	0,568	0,515	0,480	0,359	0,321	0,302	0,269	2,4016
0,7000	1,148	1,288	0,832	0,657	0,575	0,530	0,480	0,448	0,338	0,302	0,285	0,253	2,8018
0,8000	1,050	1,171	0,773	0,616	0,541	0,500	0,452	0,422	0,320	0,288	0,271	0,241	3,2021
0,9000	0,972	1,074	0,724	0,581	0,512	0,475	0,429	0,399	0,306	0,275	0,260	0,232	3,6023
1,0000	0,905	0,991	0,682	0,552	0,487	0,452	0,409	0,380	0,293	0,264	0,250	0,223	4,0026
1,2500	0,775	0,830	0,598	0,490	0,436	0,407	0,366	0,340	0,267	0,241	0,228	0,204	5,0033
1,6000	0,649	0,680	0,512	0,428	0,382	0,357	0,322	0,297	0,238	0,216	0,204	0,183	6,4042
2,0000	0,548	0,572	0,442	0,374	0,336	0,316	0,283	0,262	0,212	0,194	0,183	0,165	8,0052
2,5000	0,459	0,481	0,379	0,325	0,294	0,277	0,247	0,230	0,189	0,172	0,163	0,148	10,007
3,2000	0,378	0,399	0,318	0,276	0,252	0,237	0,212	0,186	0,164	0,150	0,142	0,129	12,808
4,0000	0,316	0,336	0,270	0,237	0,217	0,205	0,184	0,170	0,144	0,132	0,125	0,114	16,010
5,0000	0,264	0,283	0,229	0,203	0,187	0,176	0,159	0,147	0,126	0,115	0,110	0,100	20,013
6,0000	0,228	0,246	0,200	0,178	0,164	0,156	0,141	0,130	0,111	0,103	0,098	0,090	24,016
7,0000	0,202	0,218	0,178	0,159	0,147	0,140	0,127	0,117	0,101	0,093	0,089	0,082	28,018
8,0000	0,181	0,196	0,161	0,145	0,134	0,127	0,116	0,107	0,093	0,086	0,082	0,076	32,021
9,0000	0,165	0,179	0,147	0,133	0,123	0,117	0,107	0,099	0,086	0,080	0,076	0,071	36,023
10,0000	0,152	0,165	0,136	0,123	0,114	0,109	0,099	0,092	0,080	0,074	0,072	0,066	40,026
11,0000	0,141	0,153	0,127	0,115	0,107	0,102	0,093	0,086	0,075	0,070	0,068	0,062	44,029
12,0000	0,132	0,143	0,118	0,108	0,100	0,096	0,087	0,082	0,071	0,066	0,064	0,059	48,031

E_m, МэВ/а. е. м	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	1,994	0,851	0,564	0,530	0,471	0,311	0,190	0,135	0,089	0,713	0,907	0,692	0,0500
0,0160	2,214	0,934	0,627	0,590	0,525	0,354	0,220	0,156	0,104	0,802	1,020	0,771	0,0640
0,0200	2,408	0,989	0,684	0,644	0,576	0,400	0,250	0,182	0,121	0,889	1,131	0,840	0,0801
0,0250	2,617	1,038	0,746	0,703	0,636	0,456	0,292	0,213	0,154	0,985	1,254	0,916	0,1001
0,0320	2,904	1,102	0,817	0,777	0,710	0,532	0,346	0,261	0,181	1,107	1,412	1,013	0,1281
0,0400	3,167	1,152	0,882	0,849	0,782	0,611	0,405	0,310	0,220	1,224	1,562	1,106	0,1601
0,0500	3,442	1,211	0,956	0,930	0,865	0,698	0,470	0,366	0,265	1,346	1,716	1,208	0,2001
0,0600	3,723	1,274	1,033	0,999	0,944	0,777	0,528	0,416	0,305	1,450	1,851	1,302	0,2402
0,0700	3,977	1,347	1,103	1,071	1,016	0,847	0,577	0,459	0,339	1,542	1,966	1,394	0,2802
0,0800	4,229	1,420	1,171	1,138	1,084	0,910	0,624	0,497	0,369	1,623	2,068	1,482	0,3202
0,0900	4,451	1,493	1,235	1,204	1,146	0,967	0,665	0,532	0,394	1,695	2,155	1,565	0,3602
0,1000	4,685	1,572	1,303	1,262	1,201	1,018	0,703	0,559	0,415	1,757	2,235	1,642	0,4003
0,1250	5,227	1,745	1,442	1,389	1,327	1,121	0,772	0,615	0,457	1,888	2,403	1,816	0,5003
0,1600	5,863	1,955	1,604	1,546	1,466	1,222	0,838	0,667	0,495	2,021	2,568	2,025	0,6404
0,2000	6,376	2,117	1,734	1,665	1,574	1,279	0,870	0,691	0,510	2,096	2,660	2,188	0,8005
0,2500	6,764	2,239	1,816	1,748	1,632	1,290	0,872	0,684	0,503	2,114	2,679	2,306	1,0007
0,3200	6,947	2,268	1,844	1,760	1,610	1,234	0,823	0,642	0,469	2,061	2,617	2,337	1,2808
0,4000	6,775	2,237	1,776	1,688	1,529	1,141	0,755	0,587	0,428	1,947	2,479	2,254	1,6010
0,5000	6,355	2,112	1,640	1,561	1,396	1,027	0,677	0,529	0,385	1,786	2,280	2,094	2,0013
0,6000	5,742	1,926	1,458	1,385	1,238	0,905	0,600	0,468	0,343	1,593	2,044	1,869	2,4016
0,7000	5,110	1,756	1,292	1,227	1,098	0,802	0,537	0,418	0,309	1,427	1,834	1,659	2,8018
0,8000	4,540	1,593	1,152	1,098	0,982	0,718	0,486	0,379	0,282	1,287	1,652	1,480	3,2021
0,9000	4,056	1,446	1,036	0,987	0,878	0,647	0,442	0,349	0,259	1,170	1,500	1,328	3,6023
1,0000	3,676	1,329	0,949	0,900	0,802	0,594	0,409	0,326	0,242	1,073	1,374	1,209	4,0026
1,2500	2,971	1,113	0,792	0,756	0,672	0,504	0,354	0,286	0,216	0,895	1,137	1,003	5,0033
1,6000	2,316	0,907	0,655	0,626	0,561	0,428	0,307	0,250	0,193	0,730	0,914	0,814	6,4042
2,0000	1,830	0,750	0,556	0,530	0,479	0,372	0,272	0,223	0,175	0,610	0,751	0,674	8,0052
2,5000	1,432	0,616	0,470	0,447	0,413	0,327	0,242	0,202	0,161	0,510	0,617	0,557	10,007
3,2000	1,112	0,494	0,392	0,374	0,347	0,281	0,214	0,178	0,143	0,420	0,501	0,456	12,808
4,0000	0,891	0,403	0,329	0,316	0,297	0,243	0,186	0,157	0,127	0,352	0,415	0,380	16,010
5,0000	0,728	0,331	0,277	0,266	0,251	0,208	0,162	0,137	0,112	0,296	0,347	0,318	20,013
6,0000	0,621	0,282	0,240	0,231	0,219	0,183	0,143	0,121	0,100	0,256	0,299	0,274	24,016
7,0000	0,546	0,248	0,213	0,206	0,194	0,163	0,128	0,110	0,091	0,228	0,265	0,243	28,018
8,0000	0,489	0,221	0,192	0,186	0,175	0,148	0,116	0,100	0,083	0,205	0,238	0,219	32,021
9,0000	0,443	0,201	0,175	0,169	0,160	0,135	0,107	0,092	0,077	0,187	0,217	0,200	36,023
10,0000	0,407	0,186	0,162	0,156	0,148	0,125	0,099	0,085	0,071	0,172	0,199	0,184	40,026
11,0000	0,376	0,172	0,151	0,146	0,138	0,116	0,092	0,079	0,066	0,160	0,185	0,171	44,029
12,0000	0,350	0,161	0,141	0,136	0,129	0,109	0,087	0,075	0,062	0,149	0,172	0,160	48,031

Таблица 42.4. **Пробег R, мг/см², ионов гелия $^4_2He^+$ в различных веществах [1]**

E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,085	0,099	0,142	0,219	0,267	0,307	0,337	0,371	0,583	0,685	0,746	0,874	0,0500
0,0160	0,100	0,117	0,166	0,255	0,310	0,356	0,390	0,428	0,673	0,790	0,860	1,007	0,0640
0,0200	0,114	0,135	0,190	0,292	0,356	0,406	0,444	0,487	0,764	0,897	0,976	1,143	0,0801
0,0250	0,131	0,155	0,218	0,333	0,406	0,462	0,505	0,552	0,867	1,017	1,107	1,296	0,1001
0,0320	0,152	0,180	0,252	0,385	0,470	0,532	0,580	0,634	0,996	1,167	1,269	1,486	0,1281
0,0400	0,174	0,206	0,288	0,438	0,534	0,603	0,658	0,718	1,127	1,320	1,435	1,679	0,1601
0,0500	0,198	0,235	0,327	0,498	0,607	0,684	0,745	0,812	1,275	1,490	1,620	1,895	0,2001
0,0600	0,221	0,262	0,365	0,553	0,674	0,758	0,825	0,898	1,410	1,645	1,788	2,090	0,2402
0,0700	0,243	0,287	0,400	0,604	0,737	0,827	0,900	0,979	1,535	1,789	1,944	2,271	0,2802
0,0800	0,263	0,311	0,433	0,654	0,796	0,892	0,971	1,055	1,654	1,924	2,090	2,441	0,3202
0,0900	0,283	0,334	0,465	0,701	0,853	0,955	1,039	1,128	1,766	2,053	2,229	2,602	0,3602
0,1000	0,303	0,356	0,497	0,747	0,908	1,016	1,105	1,199	1,874	2,176	2,362	2,756	0,4003
0,1250	0,351	0,409	0,574	0,857	1,041	1,162	1,263	1,369	2,129	2,467	2,675	3,118	0,5003
0,1600	0,418	0,480	0,680	1,006	1,218	1,358	1,477	1,597	2,466	2,852	3,086	3,591	0,6404
0,2000	0,496	0,559	0,802	1,175	1,419	1,579	1,718	1,854	2,840	3,277	3,539	4,110	0,8005
0,2500	0,599	0,658	0,959	1,389	1,672	1,858	2,022	2,178	3,304	3,802	4,099	4,751	1,0007
0,3200	0,752	0,802	1,191	1,700	2,036	2,259	2,461	2,647	3,964	4,547	4,892	5,656	1,2808
0,4000	0,945	0,977	1,475	2,075	2,474	2,738	2,986	3,209	4,743	5,423	5,825	6,718	1,6010
0,5000	1,211	1,216	1,860	2,577	3,055	3,372	3,682	3,955	5,759	6,564	7,039	8,099	2,0013
0,6000	1,510	1,481	2,283	3,120	3,680	4,052	4,430	4,758	6,838	7,773	8,323	9,551	2,4016
0,7000	1,842	1,777	2,745	3,708	4,353	4,782	5,236	5,622	7,989	9,060	9,687	11,088	2,8018
0,8000	2,207	2,103	3,244	4,337	5,072	5,560	6,095	6,544	9,207	10,418	11,126	12,709	3,2021
0,9000	2,604	2,460	3,779	5,006	5,833	6,381	7,004	7,521	10,485	11,842	12,633	14,402	3,6023
1,0000	3,031	2,848	4,349	5,714	5,635	7,245	7,961	8,549	11,821	13,328	14,205	16,164	4,0026
1,2500	4,228	3,955	5,920	7,642	8,811	9,584	10,553	11,339	15,403	17,304	18,411	20,866	5,0033
1,6000	6,211	5,826	8,460	10,711	12,251	13,272	14,645	15,759	20,971	23,466	24,929	28,141	6,4042
2,0000	8,906	8,403	11,835	14,723	16,729	18,054	19,967	21,512	28,111	31,320	33,237	37,383	8,0052
2,5000	12,910	12,232	16,742	20,475	23,109	24,850	27,556	29,696	38,143	42,332	44,862	50,241	10,007
3,2000	19,669	18,656	24,857	29,860	33,450	35,850	39,838	42,951	54,141	59,869	63,338	70,594	12,808
4,0000	28,981	27,434	35,838	42,415	47,199	50,459	56,090	60,545	75,070	82,738	87,383	97,044	16,010
5,0000	42,903	40,463	52,011	60,740	67,151	71,624	79,576	85,969	104,928	115,401	121,564	134,555	20,013
6,0000	59,245	55,686	70,787	81,859	90,060	95,848	106,434	115,008	138,814	152,317	160,110	176,642	24,016
7,0000	77,926	73,019	92,063	105,656	115,831	123,000	136,481	147,486	176,530	193,264	202,825	223,087	28,018
8,0000	98,882	92,397	115,752	132,035	144,354	153,004	169,563	183,268	217,797	238,083	249,497	273,752	32,021
9,0000	122,021	113,778	141,783	160,909	175,528	185,766	205,590	222,233	262,558	286,598	299,989	328,433	36,023
10,0000	147,287	137,127	170,092	192,190	209,289	221,197	244,530	264,234	310,742	338,683	354,114	386,980	40,026
11,0000	174,648	162,394	200,627	225,799	245,552	259,221	286,299	309,135	362,231	394,145	411,613	449,291	44,029
12,0000	204,051	189,540	233,337	261,704	284,239	299,753	330,801	356,851	416,882	452,868	472,467	515,303	48,031

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	0,032	0,081	0,123	0,132	0,149	0,237	0,409	0,596	0,917	0,097	0,075	0,095	0,0500
0,0160	0,038	0,097	0,146	0,156	0,176	0,277	0,474	0,688	1,056	0,115	0,089	0,113	0,0640
0,0200	0,045	0,113	0,170	0,181	0,204	0,318	0,540	0,780	1,194	0,133	0,103	0,133	0,0801
0,0250	0,053	0,132	0,197	0,210	0,236	0,364	0,613	0,879	1,337	0,154	0,120	0,155	0,1001
0,0320	0,062	0,158	0,232	0,247	0,277	0,420	0,699	0,996	1,501	0,180	0,140	0,183	0,1281
0,0400	0,073	0,186	0,269	0,286	0,319	0,475	0,783	1,107	1,659	0,207	0,162	0,213	0,1601
0,0500	0,085	0,219	0,312	0,330	0,367	0,536	0,874	1,225	1,822	0,238	0,186	0,247	0,2001
0,0600	0,096	0,251	0,352	0,371	0,411	0,590	0,954	1,327	1,963	0,267	0,208	0,279	0,2402
0,0700	0,106	0,282	0,390	0,410	0,452	0,639	1,027	1,419	2,087	0,294	0,229	0,309	0,2802
0,0800	0,116	0,311	0,425	0,446	0,490	0,685	1,093	1,503	2,200	0,319	0,249	0,336	0,3202
0,0900	0,125	0,338	0,458	0,480	0,526	0,727	1,156	1,580	2,305	0,343	0,268	0,363	0,3602
0,1000	0,134	0,364	0,490	0,513	0,560	0,768	1,214	1,654	2,404	0,366	0,286	0,388	0,4003
0,1250	0,154	0,425	0,563	0,588	0,639	0,861	1,350	1,824	2,633	0,421	0,329	0,445	0,5003
0,1600	0,179	0,500	0,654	0,684	0,739	0,981	1,523	2,042	2,927	0,493	0,386	0,518	0,6404
0,2000	0,206	0,579	0,750	0,783	0,844	1,109	1,711	2,278	3,245	0,570	0,447	0,594	0,8005
0,2500	0,236	0,671	0,863	0,900	0,969	1,264	1,940	2,569	3,640	0,665	0,522	0,683	1,0007
0,3200	0,277	0,795	1,016	1,060	1,142	1,486	2,271	2,991	4,217	0,799	0,627	0,804	1,2808
0,4000	0,323	0,937	1,193	1,246	1,346	1,756	2,677	3,513	4,932	0,959	0,753	0,943	1,6010
0,5000	0,385	1,121	1,428	1,493	1,620	2,126	3,238	4,232	5,919	1,174	0,922	1,128	2,0013
0,6000	0,451	1,320	1,687	1,765	1,925	2,542	3,867	5,038	7,022	1,412	1,107	1,330	2,4016
0,7000	0 525	1,538	1,979	2,073	2,269	3,013	4,573	5,944	8,255	1,678	1,314	1,558	2,8018

E_m, МэВ/а. е. м	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,8000	0,608	1,778	2,308	2,418	2,655	3,541	5,357	6,951	9,614	1,973	1,545	1,814	3,2021
0,9000	0,701	2,042	2,674	2,803	3,087	4,128	6,222	8,052	11,096	2,300	1,799	2,099	3,6023
1,0000	0,805	2,331	3,079	3,227	3,564	4,774	7,164	9,239	12,695	2,658	2,078	2,416	4,0026
1,2500	1,109	3,156	4,236	4,444	4,931	6,608	9,801	12,526	17,083	3,682	2,881	3,328	5,0033
1,6000	1,645	4,556	6,189	6,487	7,222	9,636	14,065	17,789	23,963	5,422	4,262	4,885	6,4042
2,0000	2,426	6,504	8,851	9,277	10,321	13,660	19,623	24,590	32,679	7,829	6,201	7,054	8,0052
2,5000	3,668	9,461	12,779	13,403	14,836	19,419	27,441	34,042	44,628	11,431	9,151	10,333	10,007
3,2000	5,900	14,568	19,340	20,286	22,270	28,705	39,795	48,882	63,208	17,513	14,216	15,922	12,808
4,0000	9,134	21,781	28,294	29,645	32,283	41,006	55,903	68,123	87,095	25,868	21,267	23,652	16,010
5,0000	14,129	32,801	41,613	43,505	47,007	58,885	79,051	95,574	120,776	38,311	31,861	35,228	20,013
6,0000	20,100	45,939	57,189	59,692	64,139	79,483	105,475	126,758	158,699	52,879	44,322	48,830	24,016
7,0000	26,987	61,095	74,919	78,105	83,596	102,708	135,103	161,546	200,864	69,481	58,564	64,355	28,018
8,0000	34,742	78,207	94,718	98,633	105,319	128,499	167,891	199,876	247,128	88,040	74,522	81,703	32,021
9,0000	43,347	97,188	116,539	121,239	129,234	156,809	203,844	241,758	297,426	108,521	92,165	100,844	36,023
10,0000	52,785	117,905	140,308	145,857	155,254	187,581	242,838	287,126	351,710	130,883	111,457	121,730	40,026
11,0000	63,031	140,299	165,946	172,408	183,319	220,770	284,780	335,901	409,980	155,069	132,350	144,298	44,029
12,0000	74,083	164,342	193,410	200,852	213,383	256,324	329,587	387,987	472,165	181,040	154,816	168,510	48,031

Таблица 42.5. **Тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см$^{-2}$), для ионов лития $^7_3Li^+$ [1]**
E_m — энергия на единицу массы налетающей частицы; E_m — полная энергия

E_m, МэВ/а. е. м	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	1,355	1,121	0,821	0,546	0,444	0,402	0,373	0,345	0,219	0,188	0,172	0,148	0,0877
0,0160	1,533	1,268	0,929	0,618	0,502	0,455	0,422	0,390	0,248	0,212	0,195	0,167	0,1123
0,0200	1,714	1,418	1,039	0,691	0,561	0,509	0,472	0,436	0,277	0,237	0,218	0,187	0,1403
0,0250	1,917	1,586	1,162	0,772	0,627	0,569	0,527	0,488	0,310	0,265	0,245	0,209	0,1754
0,0320	2,167	1,796	1,315	0,874	0,711	0,647	0,597	0,552	0,351	0,301	0,277	0,238	0,2245
0,0400	2,407	2,004	1,464	0,976	0,796	0,726	0,669	0,619	0,394	0,339	0,312	0,268	0,2806
0,0500	2,654	2,224	1,620	1,085	0,889	0,810	0,747	0,692	0,439	0,382	0,352	0,302	0,3508
0,0600	2,854	2,415	1,749	1,179	0,969	0,880	0,813	0,754	0,483	0,420	0,387	0,333	0,4210
0,0700	3,015	2,579	1,856	1,258	1,039	0,943	0,872	0,809	0,520	0,455	0,421	0,362	0,4911
0,0800	3,144	2,724	1,943	1,327	1,098	0,995	0,919	0,855	0,554	0,486	0,449	0,387	0,5613
0,0900	3,244	2,847	2,014	1,385	1,148	1,043	0,960	0,894	0,586	0,512	0,475	0,410	0,6314
0,1000	3,322	2,954	2,070	1,435	1,192	1,081	0,994	0,929	0,613	0,536	0,497	0,428	0,7016
0,1250	3,437	3,171	2,162	1,522	1,271	1,152	1,059	0,992	0,665	0,581	0,544	0,470	0,8770
0,1600	3,467	3,370	2,210	1,582	1,330	1,206	1,107	1,038	0,707	0,621	0,582	0,508	1,1226
0,2000	3,412	3,463	2,204	1,602	1,355	1,228	1,126	1,056	0,732	0,646	0,606	0,529	1,4032
0,2500	3,290	3,460	2,160	1,596	1,356	1,231	1,128	1,056	0,745	0,659	0,618	0,540	1,7540
0,3200	3,103	3,371	2,080	1,566	1,337	1,221	1,113	1,040	0,745	0,661	0,621	0,546	2,2451
0,4000	2,908	3,229	1,989	1,516	1,305	1,194	1,088	1,017	0,740	0,658	0,619	0,543	2,8064
0,5000	2,703	3,037	1,890	1,461	1,266	1,162	1,058	0,987	0,730	0,650	0,611	0,539	3,5080
0,6000	2,497	2,812	1,781	1,395	1,215	1,118	1,015	0,946	0,707	0,632	0,596	0,529	4,2096
0,7000	2,321	2,605	1,683	1,329	1,163	1,072	0,971	0,905	0,683	0,611	0,577	0,512	4,9112
0,8000	2,164	2,413	1,594	1,270	1,114	1,031	0,932	0,869	0,660	0,593	0,559	0,497	5,6128
0,9000	2,031	2,244	1,513	1,214	1,070	0,993	0,896	0,834	0,640	0,575	0,543	0,484	6,3144
1,0000	1,911	2,092	1,440	1,165	1,028	0,955	0,863	0,802	0,619	0,557	0,527	0,471	7,0160
1,2500	1,665	1,784	1,284	1,053	0,937	0,873	0,787	0,731	0,574	0,517	0,489	0,438	8,7700
1,6000	1,412	1,480	1,116	0,932	0,832	0,778	0,701	0,647	0,519	0,470	0,444	0,398	11,226
2,0000	1,204	1,257	0,972	0,823	0,740	0,694	0,622	0,576	0,467	0,426	0,402	0,363	14,032
2,5000	1,019	1,067	0,840	0,721	0,653	0,613	0,548	0,509	0,418	0,380	0,361	0,328	17,540
3,2000	0,843	0,890	0,709	0,617	0,561	0,528	0,474	0,438	0,366	0,335	0,318	0,289	22,451
4,0000	0,708	0,754	0,605	0,532	0,487	0,458	0,413	0,381	0,322	0,295	0,281	0,256	28,064
5,0000	0,593	0,636	0,514	0,455	0,419	0,396	0,357	0,330	0,283	0,258	0,247	0,226	35,080
6,0000	0,513	0,552	0,449	0,400	0,369	0,350	0,316	0,292	0,250	0,231	0,221	0,203	42,096
7,0000	0,453	0,489	0,400	0,358	0,331	0,314	0,284	0,263	0,228	0,209	0,201	0,185	49,112
8,0000	0,407	0,440	0,361	0,325	0,301	0,286	0,260	0,240	0,209	0,192	0,185	0,170	56,128
9,0000	0,370	0,401	0,330	0,298	0,276	0,263	0,239	0,221	0,193	0,178	0,171	0,158	63,144
10,0000	0,340	0,368	0,304	0,276	0,256	0,244	0,222	0,206	0,179	0,166	0,160	0,148	70,160
11,0000	0,315	0,341	0,283	0,257	0,239	0,227	0,207	0,193	0,168	0,157	0,151	0,139	77,176
12,0000	0,293	0,318	0,264	0,241	0,224	0,214	0,195	0,182	0,159	0,148	0,143	0,132	84,192

E_m, МэВ/а. е. м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	3,080	1,314	0,871	0,818	0,727	0,480	0,294	0,209	0,138	1,101	1,401	1,069	0,0877
0,0160	3,420	1,442	0,969	0,912	0,810	0,547	0,339	0,242	0,160	1,239	1,576	1,190	0,1123
0,0200	3,719	1,527	1,057	0,995	0,890	0,618	0,385	0,281	0,188	1,373	1,746	1,298	0,1403
0,0250	4,042	1,604	1,152	1,086	0,983	0,705	0,451	0,329	0,238	1,522	1,936	1,415	0,1754
0,0320	4,483	1,701	1,261	1,200	1,097	0,822	0,534	0,402	0,280	1,709	2,180	1,565	0,2245
0,0400	4,904	1,783	1,366	1,315	1,211	0,946	0,627	0,480	0,341	1,896	2,418	1,713	0,2806
0,0500	5,362	1,886	1,489	1,448	1,348	1,087	0,732	0,570	0,413	2,096	2,673	1,882	0,3508
0,0600	5,842	1,999	1,621	1,567	1,481	1,219	0,829	0,652	0,479	2,275	2,905	2,043	0,4210
0,0700	6,290	2,130	1,744	1,694	1,607	1,340	0,913	0,726	0,536	2,438	3,110	2,204	0,4911
0,0800	6,742	2,263	1,867	1,815	1,727	1,451	0,995	0,793	0,589	2,588	3,297	2,363	0,5613
0,0900	7,148	2,398	1,983	1,933	1,840	1,552	1,067	0,854	0,632	2,722	3,461	2,513	0,6314
0,1000	7,576	2,542	2,107	2,041	1,942	1,646	1,136	0,905	0,671	2,842	3,614	2,656	0,7016
0,1250	8,581	2,864	2,367	2,280	2,179	1,839	1,267	1,009	0,750	3,100	3,945	2,981	0,8770
0,1600	9,788	3,263	2,678	2,581	2,448	2,039	1,399	1,114	0,826	3,374	4,286	3,381	1,1226
0,2000	10,822	3,593	2,942	2,826	2,671	2,171	1,477	1,173	0,866	3,557	4,514	3,714	1,4032
0,2500	11,707	3,875	3,143	3,026	2,825	2,233	1,510	1,184	0,870	3,659	4,638	3,992	1,7540
0,3200	12,353	4,032	3,280	3,130	2,864	2,194	1,464	1,142	0,834	3,664	4,654	4,155	2,2451
0,4000	12,413	4,098	3,255	3,093	2,801	2,091	1,383	1,076	0,784	3,567	4,542	4,130	2,8064
0,5000	12,058	4,007	3,113	2,962	2,650	1,949	1,285	1,004	0,731	3,389	4,326	3,973	3,5080
0,6000	11,310	3,794	2,871	2,729	2,438	1,783	1,183	0,923	0,675	3,138	4,027	3,681	4,2096
0,7000	10,332	3,551	2,612	2,482	2,221	1,622	1,085	0,845	0,624	2,886	3,709	3,354	4,9112
0,8000	9,356	3,283	2,373	2,263	2,023	1,479	1,001	0,781	0,580	2,652	3,404	3,051	5,6128
0,9000	8,474	3,020	2,164	2,063	1,834	1,353	0,923	0,729	0,542	2,444	3,134	2,775	6,3144
1,0000	7,762	2,807	2,003	1,901	1,693	1,254	0,864	0,688	0,511	2,265	2,902	2,552	7,0160
1,2500	6,382	2,390	1,701	1,624	1,443	1,082	0,760	0,614	0,464	1,922	2,441	2,153	8,7700
1,6000	5,043	1,975	1,426	1,363	1,221	0,932	0,668	0,543	0,421	1,590	1,989	1,772	11,2260
2,0000	4,024	1,649	1,223	1,164	1,054	0,818	0,598	0,491	0,386	1,341	1,652	1,482	14,032
2,5000	3,175	1,365	1,042	0,992	0,915	0,724	0,537	0,448	0,356	1,130	1,368	1,235	17,54
3,2000	2,481	1,102	0,874	0,834	0,775	0,627	0,477	0,397	0,318	0,938	1,118	1,017	22,451
4,0000	1,996	0,902	0,738	0,708	0,665	0,544	0,417	0,351	0,284	0,790	0,931	0,851	28,064
5,0000	1,634	0,743	0,621	0,508	0,564	0,467	0,363	0,307	0,252	0,665	0,779	0,713	35,080
6,0000	1,396	0,635	0,539	0,519	0,491	0,410	0,320	0,272	0,224	0,576	0,673	0,616	42,096
7,0000	1,227	0,557	0,479	0,461	0,436	0,367	0,288	0,246	0,203	0,511	0,595	0,547	49,112
8,0000	1,097	0,496	0,491	0,416	0,393	0,332	0,261	0,224	0,186	0,460	0,534	0,492	56,128
9,0000	0,993	0,451	0,393	0,379	0,359	0,303	0,239	0,206	0,172	0,418	0,485	0,448	63,144
10,0000	0,910	0,415	0,362	0,350	0,331	0,280	0,221	0,190	0,159	0,385	0,445	0,412	70,160
11,0000	0,839	0,385	0,337	0,325	0,307	0,260	0,206	0,177	0,148	0,356	0,412	0,382	77,176
12,0000	0,779	0,359	0,315	0,304	0,287	0,243	0,193	0,166	0,139	0,332	0,384	0,357	84,192

Таблица 42.6. **Пробег R, мг/см², ионов лития $^7_3Li^{i+}$ в различных веществах [1]**
E_m — энергия на единицу массы налетающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а. е. м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,091	0,105	0,149	0,228	0,276	0,320	0,353	0,390	0,614	0,724	0,790	0,937	0,0877
0,0160	0,108	0,125	0,176	0,268	0,324	0,375	0,411	0,454	0,713	0,840	0,917	1,084	0,1123
0,0200	0,125	0,145	0,203	0,310	0,374	0,430	0,472	0,519	0,815	0,960	1,047	1,236	0,1403
0,0250	0,144	0,168	0,234	0,356	0,431	0,493	0,540	0,593	0,930	1,094	1,193	1,407	0,1754
0,0320	0,167	0,196	0,273	0,414	0,502	0,572	0,625	0,685	1,075	1,263	1,376	1,621	0,2245
0,0400	0,192	0,225	0,313	0,474	0,575	0,653	0,712	0,779	1,222	1,434	1,562	1,838	0,2806
0,0500	0,219	0,258	0,358	0,541	0,657	0,743	0,809	0,884	1,388	1,626	1,770	2,080	0,3508
0,0600	0,245	0,288	0,399	0,602	0,731	0,825	0,898	0,980	1,538	1,799	1,957	2,298	0,4210
0,0700	0,269	0,316	0,438	0,660	0,801	0,902	0,982	1,070	1,677	1,957	2,129	2,498	0,4911
0,0800	0,292	0,343	0,475	0,714	0,866	0,974	1,060	1,154	1,807	2,107	2,290	2,685	0,5613
0,0900	0,313	0,368	0,510	0,766	0,929	1,043	1,134	1,235	1,930	2,247	2,442	2,861	0,6314
0,1000	0,335	0,392	0,545	0,815	0,989	1,109	1,206	1,312	2,047	2,381	2,586	3,029	0,7016
0,1250	0,387	0,449	0,627	0,934	1,131	1,266	1,377	1,494	2,322	2,694	2,923	3,418	0,8770
0,1600	0,458	0,524	0,739	1,092	1,319	1,473	1,603	1,735	2,679	3,102	3,358	3,919	1,1226
0,2000	0,539	0,606	0,866	1,268	1,528	1,704	1,854	2,003	3,068	3,544	3,830	4,460	1,4032
0,2500	0,644	0,708	1,027	1,487	1,786	1,989	2,165	2,334	3,543	4,082	4,402	5,116	1,7540
0,3200	0,797	0,851	1,259	1,797	2,151	2,389	2,603	2,803	4,202	4,825	5,195	6,020	2,2451

E_m, МэВ/а.е.м	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,4000	0,984	1,021	1,535	2,162	2,576	2,854	3,113	3,349	4,958	5,676	6,101	7,050	2,8064
0,5000	1,235	1,246	1,897	2,633	3,122	3,450	3,767	4,050	5,913	6,749	7,242	8,348	3,5080
0,6000	1,505	1,486	2,279	3,125	3,688	4,066	4,445	4,776	6,890	7,843	8,405	9,663	4,2096
0,7000	1,796	1,745	2,685	3,641	4,278	4,707	5,151	5,535	7,900	8,972	9,601	11,012	4,9112
0,8000	2,110	2,025	3,113	4,181	4,895	5,374	5,889	6,326	8,945	10,138	10,836	12,403	5,6128
0,9000	2,444	2,327	3,565	4,746	5,538	6,068	6,657	7,151	10,025	11,340	12,109	13,833	6,3144
1,0000	2,801	2,651	4,041	5,336	6,207	6,789	7,455	8,009	11,140	12,580	13,421	15,302	7,0160
1,2500	3,786	3,560	5,333	6,922	7,996	8,712	9,587	10,303	14,085	15,850	16,879	19,170	8,7700
1,6000	5,391	5,076	7,390	9,407	10,782	11,699	12,901	13,883	18,595	20,841	22,158	25,061	11,226
2,0000	7,549	7,139	10,092	12,620	14,368	15,528	17,162	18,489	24,312	27,129	28,811	32,461	14,032
2,5000	10,727	10,178	13,986	17,184	19,431	20,921	23,184	24,983	32,273	35,868	38,036	42,665	17,540
3,2000	16,050	15,237	20,377	24,576	27,575	29,584	32,858	35,424	44,873	49,681	52,588	58,696	22,451
4,0000	23,345	22,115	28,980	34,412	38,347	41,030	45,590	49,207	61,270	67,597	71,426	79,418	28,064
5,0000	34,219	32,291	41,612	48,725	53,931	57,561	63,935	69,066	84,591	93,110	98,124	108,717	35,080
6,0000	46,969	44,168	56,261	65,202	71,805	76,461	84,889	91,721	111,029	121,911	128,197	141,553	42,096
7,0000	61,546	57,693	72,863	83,772	91,915	97,648	108,335	117,065	140,460	153,864	161,529	177,795	49,112
8,0000	77,913	72,827	91,364	104,373	114,191	121,081	134,173	145,010	172,689	188,866	197,979	217,365	56,128
9,0000	96,006	89,546	111,719	126,952	138,567	146,699	162,344	175,480	207,690	226,803	237,462	260,122	63,144
10,0000	115,792	107,830	133,888	151,447	165,005	174,444	192,836	208,369	245,422	267,589	279,846	305,969	70,160
11,0000	137,251	127,647	157,836	177,806	193,446	204,266	225,596	243,585	285,804	311,088	324,942	354,839	77,176
12,0000	160,349	148,972	183,531	206,012	223,836	236,107	260,555	281.068	328,736	357,218	372,746	406,695	84,192

E_m, МэВ/а.е.м	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	0,034	0,087	0,130	0,138	0,156	0,245	0,421	0,618	0,961	0,103	0,080	0,101	0,0877
0,0160	0,041	0,104	0,155	0,165	0,186	0,290	0,496	0,720	1,116	0,123	0,096	0,121	0,1123
0,0200	0,049	0,123	0,182	0,193	0,217	0,336	0,568	0,823	1,269	0,144	0,112	0,143	0,1403
0,0250	0,057	0,145	0,213	0,226	0,253	0,387	0,649	0,934	1,429	0,167	0,130	0,168	0,1754
0,0320	0,068	0,174	0,252	0,268	0,299	0,450	0,746	1,065	1,613	0,197	0,154	0,200	0,2245
0,0400	0,080	0,205	0,294	0,311	0,347	0,512	0,841	1,190	1,791	0,227	0,178	0,234	0,2806
0,0500	0,094	0,243	0,343	0,361	0,401	0,580	0,943	1,322	1,975	0,262	0,205	0,272	0,3508
0,0600	0,106	0,279	0,387	0,407	0,450	0,641	1,031	1,436	2,131	0,294	0,230	0,307	0,4210
0,0700	0,117	0,312	0,428	0,450	0,495	0,695	1,112	1,538	2,269	0,324	0,253	0,340	0,4911
0,0800	0,128	0,344	0,467	0,490	0,537	0,746	1,186	1,630	2,394	0,352	0,275	0,371	0,5613
0,0900	0,138	0,375	0,504	0,527	0,576	0,792	1,254	1,715	2,509	0,378	0,296	0,400	0,6314
0,1000	0,148	0,403	0,538	0,563	0,613	0,836	1,317	1,795	2,616	0,403	0,316	0,427	0,7016
0,1250	0,170	0,468	0,616	0,644	0,698	0,937	1,463	1,978	2,863	0,462	0,362	0,489	0,8770
0,1600	0,196	0,548	0,714	0,745	0,804	1,063	1,647	2,209	3,174	0,538	0,422	0,566	1,1226
0,2000	0,223	0,630	0,813	0,849	0,914	1,196	1,842	2,454	3,505	0,619	0,485	0,645	1,4032
0,2500	0,255	0,724	0,929	0,968	1,041	1,356	2,077	2,752	3,909	0,716	0,562	0,736	1,7540
0,3200	0,295	0,848	1,081	1,128	1,214	1,577	2,407	3,174	4,485	0,850	0,668	0,857	2,2451
0,4000	0,341	0,986	1,253	1,308	1,412	1,839	2,802	3,681	5,179	1,005	0,790	0,992	2,8064
0,5000	0,398	1,159	1,474	1,540	1,670	2,187	3,328	4,356	6,107	1,207	0,948	1,165	3,5080
0,6000	0,458	1,339	1,709	1,787	1,946	2,564	3,898	5,086	7,106	1,422	1,116	1,349	4,2096
0,7000	0,523	1,530	1,965	2,057	2,248	2,977	4,517	5,881	8,187	1,656	1,298	1,549	4,9112
0,8000	0,595	1,736	2,247	2,353	2,579	3,430	5,191	6,745	9,353	1,909	1,495	1,768	5,6128
0,9000	0,673	1,959	2,557	2,678	2,943	3,926	5,921	7,675	10,605	2,185	1,710	2,009	6,3144
1,0000	0,760	2,200	2,894	3,032	3,341	4,465	6,707	8,665	11,939	2,483	1,943	2,273	7,0160
1,2500	1,010	2,878	3,846	4,032	4,466	5,973	8,875	11,368	15,547	3,326	2,603	3,023	8,7700
1,6000	1,444	4,012	5,427	5,687	6,321	8,425	12,328	15,631	21,120	4,735	3,721	4,284	11,226
2,0000	2,069	5,572	7,558	7,921	8,802	11,647	16,779	21,076	28,099	6,662	5,274	6,021	14,032
2,5000	3,054	7,918	10,676	11,195	12,385	16,217	22,983	28,577	37,581	9,520	7,615	8,623	17,540
3,2000	4,813	11,941	15,843	16,617	18,240	23,531	32,713	40,266	52,215	14,311	11,604	13,025	22,451
4,0000	7,346	17,591	22,858	23,948	26,085	33,168	45,333	55,339	70,929	20,856	17,128	19,081	28,064
5,0000	11,247	26,198	33,261	34,774	37,585	47,133	63,413	76,781	97,236	30,575	25,403	28,122	35,080
6,0000	15,906	36,449	45,413	47,403	50,952	63,203	84,029	101,111	126,825	41,941	35,125	38,735	42,096
7,0000	21,280	48,275	59,249	61,771	66,134	81,327	107,149	128,256	159,727	54,896	46,238	50,849	49,112
8,0000	27,336	61,640	74,712	77,803	83,100	101,469	132,756	158,192	195,859	69,390	58,701	64,398	56,128
9,0000	34,066	76,482	91,774	95,480	101,800	123,606	160,869	190,942	235,189	85,406	72,497	79,365	63,144
10,0000	41,456	92,705	110,387	114,758	122,176	147,702	191,404	226,468	277,697	102,917	87,604	95,720	70,160
11,0000	49,492	110,269	130,495	135,582	144,187	173,733	224,299	264,722	323,398	121,886	103,990	113,420	77,176
12,0000	58,174	129,156	152,070	157,926	167,804	201,663	259,498	305,639	372,249	142,288	121,639	132,440	84,192

Таблица 42.7. **Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см$^{-2}$), для ионов $^{9}_{4}Be^{+}$ [1]**

E_m — энергия на единицу массы налетающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zc	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	1,800	1,489	1,091	0,725	0,589	0,534	0,495	0,458	0,291	0,249	0,229	0,196	0,1127
0,0160	2,036	1,684	1,234	0,821	0,666	0,605	0,560	0,518	0,329	0,282	0,259	0,222	0,1442
0,0200	2,276	1,883	1,380	0,917	0,745	0,676	0,626	0,579	0,368	0,315	0,290	0,248	0,1802
0,0250	2,545	2,105	1,542	1,026	0,833	0,756	0,700	0,648	0,412	0,352	0,325	0,278	0,2253
0,0320	2,876	2,384	1,745	1,160	0,944	0,859	0,792	0,733	0,466	0,400	0,368	0,316	0,2884
0,0400	3,199	2,664	1,946	1,298	1,058	0,965	0,889	0,823	0,523	0,450	0,414	0,356	0,3605
0,0500	3,538	2,966	2,160	1,447	1,186	1,080	0,996	0,922	0,585	0,509	0,469	0,403	0,4506
0,0600	3,820	3,233	2,341	1,578	1,297	1,177	1,088	1,009	0,646	0,562	0,518	0,446	0,5407
0,0700	4,050	3,465	2,493	1,690	1,396	1,266	1,171	1,087	0,698	0,611	0,566	0,486	0,6309
0,0800	4,236	3,670	2,618	1,788	1,479	1,340	1,238	1,152	0,746	0,654	0,605	0,521	0,7210
0,0900	4,381	3,846	2,720	1,871	1,550	1,409	1,297	1,208	0,791	0,692	0,642	0,553	0,8111
0,1000	4,494	3,996	2,800	1,940	1,613	1,462	1,344	1,257	0,829	0,725	0,672	0,580	0,9012
0,1250	4,653	4,293	2,926	2,060	1,721	1,560	1,434	1,343	0,900	0,787	0,736	0,636	1,1265
0,1600	4,692	4,561	2,991	2,141	1,800	1,633	1,498	1,406	0,957	0,840	0,788	0,688	1,4420
0,2000	4,633	4,702	2,993	2,176	1,841	1,667	1,529	1,434	0,994	0,877	0,823	0,718	1,8024
0,2500	4,508	4,742	2,960	2,187	1,859	1,687	1,545	1,447	1,021	0,903	0,847	0,740	2,2530
0,3200	4,327	4,701	2,900	2,184	1,865	1,702	1,551	1,450	1,038	0,922	0,866	0,761	2,8839
0,4000	4,142	4,598	2,833	2,159	1,859	1,700	1,550	1,448	1,054	0,938	0,881	0,773	3,6049
0,5000	3,947	4,435	2,760	2,133	1,849	1,697	1,546	1,441	1,065	0,949	0,893	0,787	4,5061
0,6000	3,734	4,205	2,663	2,085	1,816	1,673	1,518	1,414	1,057	0,945	0,891	0,791	5,4073
0,7000	3,547	3,981	2,572	2,032	1,777	1,638	1,484	1,384	1,044	0,934	0,882	0,782	6,3085
0,8000	3,374	3,762	2,485	1,980	1,737	1,608	1,453	1,354	1,029	0,924	0,872	0,775	7,2098
0,9000	3,222	3,560	2,401	1,925	1,697	1,575	1,421	1,323	1,015	0,912	0,862	0,768	8,1110
1,0000	3,079	3,371	2,320	1,877	1,656	1,538	1,390	1,292	0,998	0,898	0,849	0,759	9,0122
1,2500	2,766	2,962	2,132	1,749	1,557	1,450	1,307	1,213	0,953	0,859	0,812	0,727	11,265
1,6000	2,410	2,526	1,904	1,590	1,420	1,327	1,195	1,104	0,885	0,801	0,758	0,680	14,420
2,0000	2,091	2,183	1,688	1,430	1,285	1,205	1,080	1,001	0,810	0,739	0,699	0,630	18,024
2,5000	1,789	1,875	1,475	1,267	1,146	1,077	0,963	0,894	0,735	0,668	0,634	0,575	22,530
3,2000	1,491	1,575	1,254	1,091	0,993	0,934	0,838	0,775	0,647	0,592	0,562	0,510	28,839
4,0000	1,256	1,337	1,073	0,943	0,864	0,814	0,733	0,676	0,572	0,524	0,499	0,454	36,049
5,0000	1,053	1,129	0,913	0,809	0,745	0,703	0,633	0,586	0,502	0,458	0,439	0,401	45,061
6,0000	0,912	0,980	0,797	0,711	0,656	0,622	0,561	0,519	0,445	0,410	0,393	0,361	54,073
7,0000	0,804	0,869	0,709	0,635	0,587	0,558	0,505	0,467	0,404	0,372	0,357	0,328	63,085
8,0000	0,721	0,781	0,640	0,576	0,533	0,507	0,461	0,426	0,370	0,341	0,328	0,302	72,098
9,0000	0,656	0,710	0,584	0,528	0,489	0,466	0,424	0,392	0,342	0,316	0,303	0,280	81,110
10,0000	0,602	0,651	0,538	0,488	0,452	0,431	0,392	0,364	0,318	0,295	0,284	0,262	90,122
11,0000	0,557	0,603	0,500	0,455	0,422	0,402	0,366	0,341	0,298	0,277	0,267	0,246	99,134
12,0000	0,519	0,562	0,467	0,426	0,395	0,378	0,344	0,321	0,281	0,261	0,252	0,232	108,15

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	4,090	1,745	1,156	1,086	0,965	0,637	0,390	0,277	0,183	1,463	1,861	1,420	0,1127
0,0160	4,541	1,915	1,287	1,210	1,076	0,727	0,450	0,321	0,213	1,645	2,093	1,581	0,1442
0,0200	4,939	2,028	1,403	1,322	1,182	0,821	0,512	0,372	0,249	1,824	2,319	1,723	0,1802
0,0250	5,367	2,130	1,530	1,442	1,305	0,936	0,598	0,436	0,316	2,020	2,571	1,879	0,2253
0,0320	5,950	2,258	1,673	1,593	1,455	1,091	0,708	0,534	0,372	2,268	2,893	2,077	0,2884
0,0400	6,518	2,370	1,815	1,747	1,609	1,257	0,833	0,638	0,453	2,520	3,214	2,276	0,3605
0,0500	7,150	2,514	1,985	1,931	1,797	1,449	0,976	0,760	0,551	2,795	3,564	2,510	0,4506
0,0600	7,818	2,676	2,170	2,097	1,983	1,632	1,110	0,873	0,641	3,045	3,888	2,734	0,5407
0,0700	8,450	2,861	2,343	2,276	2,159	1,800	1,226	0,975	0,720	3,275	4,177	2,961	0,6309
0,0800	9,084	3,050	2,516	2,445	2,327	1,956	1,340	1,068	0,793	3,487	4,443	3,183	0,7210
0,0900	9,655	3,239	2,679	2,611	2,486	2,097	1,441	1,153	0,854	3,677	4,675	3,394	0,8111
0,1000	10,248	3,438	2,850	2,761	2,626	2,226	1,537	1,224	0,907	3,844	4,889	3,592	0,9012
0,1250	11,618	3,877	3,204	3,087	2,950	2,490	1,715	1,367	1,015	4,196	5,341	4,035	1,1265
0,1600	13,248	4,417	3,625	3,493	3,314	2,760	1,893	1,507	1,118	4,567	5,802	4,576	1,4420
0,2000	14,694	4,878	3,995	3,837	3,627	2,948	2,005	1,592	1,176	4,830	6,129	5,043	1,8024
0,2500	16,043	5,310	4,307	4,147	3,872	3,061	2,069	1,622	1,193	5,014	6,355	5,470	2,2530
0,3200	17,225	5,623	4,573	4,364	3,993	3,059	2,041	1,592	1,163	5,109	6,490	5,794	2,8839
0,4000	17,679	5,836	4,635	4,405	3,989	2,978	1,969	1,533	1,116	5,080	6,468	5,882	3,6049
0,5000	17,609	5,851	4,546	4,325	3,870	2,846	1,877	1,466	1,068	4,949	6,318	5,802	4,5061
0,6000	16,912	5,673	4,293	4,080	3,646	2,666	1,768	1,380	1,009	4,693	6,022	5,505	5,4073
0,7000	15,792	5,427	3,992	3,794	3,395	2,479	1,659	1,291	0,954	4,411	5,669	5,126	6,3085

E_m, МэВ/а. е. м	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,8000	14,584	5,118	3,700	3,528	3,153	2,306	1,560	1,217	0,904	4,134	5,307	4,755	7,2098
0,9000	13,444	4,792	3,433	3,272	2,910	2,146	1,464	1,157	0,859	3,877	4,972	4,403	8,1110
1,0000	12,505	4,522	3,227	3,062	2,728	2,021	1,392	1,109	0,824	3,649	4,675	4,111	9,0122
1,2500	10,598	3,968	2,825	2,697	2,397	1,798	1,262	1,019	0,770	3,192	4,054	3,576	11,265
1,6000	8,604	3,369	2,433	2,326	2,083	1,590	1,140	0,927	0,718	2,713	3,394	3,023	14,420
2,0000	6,988	2,865	2,123	2,022	1,830	1,421	1,038	0,852	0,670	2,329	2,870	2,574	18,024
2,5000	5,577	2,397	1,831	1,742	1,608	1,272	0,944	0,786	0,626	1,986	2,403	2,169	22,530
3,2000	4,390	1,950	1,546	1,476	1,371	1,110	0,844	0,702	0,563	1,659	1,978	1,800	28,839
4,0000	3,542	1,601	1,309	1,256	1,181	0,966	0,741	0,624	0,504	1,402	1,652	1,510	36,049
5,0000	2,903	1,319	1,104	1,062	1,001	0,830	0,645	0,545	0,447	1,181	1,383	1,267	45,061
6,0000	2,478	1,127	0,958	0,921	0,873	0,728	0,569	0,484	0,398	1,023	1,194	1,094	54,073
7,0000	2,177	0,988	0,849	0,819	0,774	0,651	0,512	0,437	0,361	0,907	1,056	0,970	63,085
8,0000	1,946	0,880	0,765	0,738	0,697	0,588	0,463	0,397	0,330	0,815	0,947	0,872	72,098
9,0000	1,759	0,799	0,696	0,672	0,636	0,538	0,424	0,364	0,304	0,741	0,860	0,793	81,110
10,0000	1,610	0,735	0,641	0,619	0,586	0,495	0,391	0,336	0,282	0,681	0,788	0,729	90,122
11,0000	1,484	0,681	0,595	0,575	0,544	0,460	0,364	0,313	0,262	0,630	0,729	0,676	99,134
12,0000	1,377	0,634	0,556	0,537	0,508	0,429	0,341	0,294	0,246	0,587	0,678	0,630	108,15

Таблица 42.8. **Пробег R, мг/см², ионов бериллия $^9_4Be^+$ в различных веществах [1]**
E_m — энергия на единицу массы налетающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е. м	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,085	0,097	0,137	0,210	0,252	0,295	0,325	0,360	0,566	0,669	0,730	0,868	0,1127
0,0160	0,101	0,116	0,163	0,248	0,298	0,346	0,381	0,421	0,660	0,779	0,850	1,009	0,1448
0,0200	0,117	0,136	0,189	0,287	0,346	0,400	0,438	0,483	0,758	0,893	0,974	1,154	0,1802
0,0250	0,135	0,157	0,219	0,332	0,400	0,460	0,503	0,554	0,868	1,022	1,114	1,318	0,2253
0,0320	0,158	0,185	0,256	0,388	0,469	0,536	0,585	0,642	1,006	1,183	1,289	1,522	0,2884
0,0400	0,182	0,213	0,295	0,445	0,539	0,613	0,669	0,733	1,148	1,348	1,468	1,731	0,3605
0,0500	0,208	0,245	0,338	0,510	0,617	0,699	0,762	0,834	1,307	1,532	1,667	1,963	0,4506
0,0600	0,233	0,273	0,378	0,568	0,689	0,778	0,848	0,926	1,451	1,697	1,847	2,172	0,5407
0,0700	0,256	0,300	0,414	0,623	0,754	0,851	0,926	1,011	1,583	1,849	2,011	2,362	0,6309
0,0800	0,277	0,325	0,450	0,675	0,816	0,920	1,001	1,091	1,706	1,989	2,163	2,539	0,7210
0,0900	0,298	0,349	0,483	0,724	0,876	0,986	1,072	1,168	1,823	2,123	2,307	2,707	0,8111
0,1000	0,319	0,372	0,516	0,771	0,933	1,048	1,140	1,241	1,935	2,250	2,444	2,866	0,9012
0,1250	0,368	0,427	0,595	0,884	1,068	1,197	1,302	1,414	2,195	2,548	2,764	3,236	1,1265
0,1600	0,435	0,498	0,701	1,033	1,246	1,394	1,517	1,643	2,534	2,934	3,177	3,711	1,4420
0,2000	0,512	0,575	0,821	1,200	1,444	1,612	1,755	1,896	2,903	3,354	3,624	4,224	1,8024
0,2500	0,611	0,671	0,973	1,407	1,688	1,881	2,048	2,209	3,350	3,860	4,163	4,841	2,2530
0,3200	0,754	0,804	1,188	1,695	2,027	2,253	2,455	2,644	3,963	4,551	4,900	5,682	2,8839
0,4000	0,924	0,960	1,440	2,027	2,414	2,677	2,920	3,142	4,652	5,326	5,726	6,621	3,6049
0,5000	1,147	1,159	1,762	2,447	2,900	3,208	3,503	3,766	5,503	6,282	6,742	7,777	4,5061
0,6000	1,382	1,368	2,094	2,875	3,392	3,743	4,091	4,398	6,352	7,233	7,753	8,919	5,4073
0,7000	1,629	1,588	2,439	3,313	3,894	4,287	4,691	5,042	7,209	8,192	8,769	10,065	6,3085
0,8000	1,890	1,821	2,795	3,762	4,407	4,842	5,305	5,700	8,079	9,162	9,797	11,223	7,2098
0,9000	2,163	2,067	3,164	4,223	4,931	5,409	5,932	6,374	8,961	10,144	10,836	12,391	8,1110
1,0000	2,450	2,328	3,546	4,698	5,469	5,988	6,573	7,063	9,856	11,140	11,890	13,571	9,0122
1,2500	3,222	3,041	4,560	5,942	6,872	7,497	8,246	8,863	12,167	13,705	14,603	16,605	11,265
1,6000	4,445	4,196	6,127	7,835	8,996	9,773	10,771	11,590	15,603	17,508	18,625	21,095	14,420
2,0000	6,054	5,734	8,141	10,230	11,668	12,627	13,947	15,024	19,865	22,196	23,585	26,611	18,024
2,5000	8,389	7,967	11,003	13,584	15,389	16,590	18,373	19,796	25,715	28,618	30,364	34,110	22,530
3,2000	12,265	11,650	15,656	16,967	21,320	22,898	25,417	27,399	34,890	38,676	40,960	45,783	28,839
4,0000	17,552	16,634	21,891	26,095	29,126	31,193	34,644	37,388	46,773	51,660	54,612	60,800	36,049
5,0000	25,417	23,996	31,029	36,449	40,399	43,152	47,914	51,753	63,643	70,115	73,925	81,994	45,061
6,0000	34,639	32,586	41,624	48,366	53,326	56,820	63,069	68,138	82,764	90,945	95,675	105,743	54,073
7,0000	45,188	42,373	53,637	61,803	67,878	72,152	80,035	86,477	104,061	114,067	119,795	131,968	63,085
8,0000	57,040	53,333	67,036	76,722	84,010	89,122	98,746	106,715	127,401	139,416	146,192	160,624	72,098
9,0000	70,155	65,451	81,789	93,088	101,678	107,691	119,165	128,800	152,770	166,913	174,809	191,616	81,110
10,0000	84,508	78,716	97,872	110,858	120,858	127,818	141,286	152,660	180,143	196,501	205,557	224,876	90,122
11,0000	100,089	93,104	115,259	129,997	141,508	149,471	165,072	178,229	209,464	228,085	238,300	260,359	99,134
12,0000	116,873	108,600	133,931	150,492	163,592	172,608	190,475	205,467	240,660	261,605	273,037	298,040	108,15

E_m, МэВ/а. е. м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	0,031	0,081	0,120	0,127	0,143	0,224	0,385	0,566	0,883	0,095	0,074	0,093	0,1127
0,0160	0,038	0,097	0,144	0,153	0,171	0,267	0,454	0,663	1,030	0,114	0,089	0,112	0,1442
0,0200	0,045	0,115	0,169	0,180	0,201	0,311	0,524	0,761	1,176	0,134	0,105	0,133	0,1802
0,0250	0,054	0,136	0,199	0,211	0,236	0,360	0,601	0,867	1,328	0,156	0,122	0,157	0,2253
0,0320	0,064	0,164	0,237	0,251	0,280	0,420	0,695	0,993	1,505	0,185	0,145	0,188	0,2884
0,0400	0,076	0,194	0,277	0,293	0,326	0,480	0,786	1,113	1,676	0,215	0,168	0,220	0,3605
0,0500	0,089	0,231	0,324	0,341	0,378	0,545	0,884	1,240	1,852	0,248	0,194	0,257	0,4506
0,0600	0,100	0,265	0,366	0,385	0,425	0,603	0,969	1,349	2,002	0,278	0,218	0,291	0,5407
0,0700	0,111	0,297	0,406	0,426	0,468	0,655	1,045	1,446	2,134	0,307	0,240	0,322	0,6309
0,0800	0,122	0,328	0,443	0,464	0,508	0,703	1,115	1,535	2,253	0,333	0,261	0,351	0,7210
0,0900	0,131	0,356	0,478	0,500	0,545	0,748	1,180	1,616	2,363	0,359	0,281	0,379	0,8111
0,1000	0,140	0,383	0,510	0,533	0,580	0,789	1,241	1,691	2,465	0,382	0,300	0,405	0,9012
0,1250	0,161	0,445	0,584	0,610	0,661	0,885	1,379	1,865	2,699	0,438	0,344	0,464	1,1265
0,1600	0,186	0,521	0,677	0,706	0,762	1,005	1,554	2,084	2,994	0,510	0,400	0,537	1,4420
0,2000	0,212	0,598	0,771	0,804	0,866	1,131	1,739	2,317	3,308	0,587	0,461	0,612	1,8024
0,2500	0,241	0,687	0,880	0,917	0,986	1,281	1,960	2,597	3,688	0,678	0,533	0,697	2,2530
0,3200	0,279	0,802	1,022	1,065	1,146	1,487	2,267	2,990	4,224	0,803	0,631	0,809	2,8839
0,4000	0,320	0,928	1,179	1,230	1,327	1,726	2,626	3,451	4,857	0,945	0,742	0,933	3,6049
0,5000	0,372	1,082	1,375	1,436	1,556	2,036	3,095	4,053	5,683	1,124	0,883	1,087	4,5061
0,6000	0,424	1,239	1,579	1,651	1,796	2,363	3,590	4,687	6,551	1,311	1,030	1,247	5,4073
0,7000	0,479	1,401	1,797	1,880	2,052	2,713	4,116	5,362	7,469	1,510	1,184	1,416	6,3085
0,8000	0,538	1,572	2,031	2,126	2,328	3,090	4,676	6,081	8,439	1,721	1,348	1,599	7,2098
0,9000	0,603	1,754	2,284	2,392	2,625	3,496	5,273	6,840	9,462	1,946	1,524	1,796	8,1110
1,0000	0,672	1,948	2,555	2,676	2,945	3,928	5,904	7,636	10,533	2,185	1,711	2,008	9,0122
1,2500	0,868	2,480	3,302	3,461	3,827	5,111	7,605	9,756	13,363	2,846	2,229	2,596	11,265
1,6000	1,199	3,344	4,506	4,722	5,241	6,980	10,236	13,004	17,610	3,919	3,080	3,557	14,420
2,0000	1,665	4,506	6,095	6,387	7,090	9,381	13,554	17,063	22,813	5,356	4,238	4,851	18,024
2,5000	2,389	6,230	8,386	8,793	9,723	12,739	18,113	22,575	29,781	7,456	5,958	6,763	22,530
3,2000	3,669	9,159	12,148	12,740	13,986	18,065	25,198	31,087	40,437	10,944	8,862	9,968	28,839
4,0000	5,505	13,254	17,232	18,053	19,672	25,049	34,344	42,011	53,999	15,688	12,866	14,357	36,049
5,0000	8,327	19,481	24,757	25,884	27,991	35,151	47,423	57,521	73,030	22,718	18,851	20,897	45,061
6,0000	11,697	26,894	33,547	35,019	37,658	46,774	62,333	75,117	94,429	30,939	25,883	28,573	54,073
7,0000	15,585	35,452	43,558	45,415	48,644	59,889	79,063	94,761	118,238	40,313	33,924	37,339	63,085
8,0000	19,971	45,131	54,756	57,026	60,931	74,476	97,607	116,440	144,404	50,810	42,950	47,151	72,098
9,0000	24,849	50,888	67,123	69,839	74,485	90,521	117,984	140,178	172,912	62,418	52,950	58,000	81,110
10,0000	30,210	67,658	80,627	83,823	89,267	108,002	140,136	165,950	203,749	75,122	63,909	69,865	90,122
11,0000	36,045	80,410	95,226	98,943	105,248	126,901	164,020	193,726	236,932	88,895	75,807	82,716	99,134
12,0000	42,353	94,135	110,904	115,180	122,410	147,197	189,598	223,458	272,429	103,720	88,631	96,537	108,15

Таблица 42.9. **Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см$^{-2}$), для ионов $^{1}_{5}B^{+}$ [1]**
E_m — энергия на единицу массы налетающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а. е. м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zc	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	2,222	1,838	1,347	0,896	0,727	0,660	0,611	0,566	0,360	0,308	0,283	0,242	0,1376
0,0160	2,514	2,080	1,524	1,013	0,823	0,747	0,692	0,640	0,407	0,348	0,320	0,274	0,1761
0,0200	2,811	2,325	1,703	1,133	0,920	0,835	0,773	0,715	0,455	0,389	0,358	0,307	0,2202
0,0250	3,142	2,600	1,904	1,266	1,028	0,933	0,865	0,800	0,508	0,435	0,401	0,343	0,2752
0,0320	3,551	2,943	2,155	1,433	1,166	1,060	0,978	0,905	0,575	0,493	0,455	0,390	0,3523
0,0400	3,940	3,281	2,397	1,599	1,304	1,189	1,095	1,014	0,645	0,555	0,510	0,439	0,4404
0,0500	4,341	3,638	2,650	1,776	1,455	1,325	1,222	1,132	0,718	0,624	0,575	0,494	0,5504
0,0600	4,668	3,950	2,860	1,928	1,584	1,439	1,330	1,233	0,789	0,686	0,634	0,545	0,6605
0,0700	4,932	4,218	3,035	2,058	1,700	1,542	1,426	1,323	0,850	0,744	0,689	0,592	0,7706
0,0800	5,145	4,458	3,180	2,172	1,797	1,628	1,504	1,399	0,906	0,795	0,735	0,633	0,8807
0,0900	5,317	4,667	3,300	2,271	1,881	1,710	1,574	1,465	0,960	0,840	0,779	0,672	0,9900
0,1000	5,457	4,852	3,400	2,356	1,958	1,775	1,632	1,527	1,006	0,881	0,816	0,704	1,1076
0,1250	5,689	5,249	3,578	2,519	2,104	1,907	1,753	1,642	1,100	0,963	0,900	0,778	1,3761
0,1600	5,830	5,667	3,716	2,661	2,237	2,029	1,862	1,746	1,189	1,044	0,979	0,855	1,7614
0,2000	5,861	5,948	3,786	2,753	2,329	2,109	1,935	1,814	1,257	1,109	1,041	0,909	2,2018
0,2500	5,806	6,108	3,813	2,817	2,394	2,173	1,990	1,864	1,315	1,163	1,090	0,953	2,7521
0,3200	5,672	6,163	3,802	2,863	2,445	2,232	2,034	1,901	1,361	1,209	1,135	0,998	3,5229

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zc	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,4000	5,506	6,112	3,766	2,870	2,470	2,260	2,060	1,924	1,401	1,247	1,171	1,028	4,4036
0,5000	5,309	5,966	3,713	2,870	2,487	2,283	2,079	1,938	1,433	1,277	1,201	1,058	5,5045
0,6000	5,091	5,733	3,631	2,843	2,476	2,280	2,070	1,928	1,442	1,289	1,215	1,078	6,6054
0,7000	4,894	5,494	3,549	2,804	2,452	2,261	2,048	1,909	1,441	1,288	1,217	1,079	7,7063
0,8000	4,707	5,248	3,466	2,762	2,423	2,243	2,028	1,889	1,435	1,289	1,217	1,081	8,8072
0,9000	4,540	5,017	3,383	2,713	2,392	2,219	2,003	1,864	1,431	1,286	1,214	1,083	9,9081
1,0000	4,379	4,795	3,300	2,670	2,356	2,188	1,977	1,838	1,419	1,277	1,208	1,079	11,009
1,2500	4,015	4,300	3,096	2,538	2,260	2,105	1,898	1,761	1,384	1,248	1,179	1,056	13,761
1,6000	3,577	3,749	2,825	2,359	2,108	1,969	1,774	1,639	1,314	1,190	1,125	1,009	17,614
2,0000	3,159	3,297	2,550	2,160	1,941	1,821	1,632	1,512	1,224	1,117	1,056	0,951	22,018
2,5000	2,741	2,872	2,260	1,941	1,756	1,650	1,476	1,369	1,125	1,024	0,972	0,881	27,522
3,2000	2,309	2,439	1,942	1,689	1,538	1,447	1,297	1,200	1,002	0,916	0,870	0,790	35,229
4,0000	1,955	2,082	1,671	1,469	1,345	1,267	1,141	1,053	0,891	0,816	0,777	0,707	44,036
5,0000	1,644	1,763	1,425	1,263	1,163	1,097	0,989	0,915	0,784	0,715	0,685	0,626	55,045
6,0000	1,424	1,531	1,245	1,110	1,024	0,971	0,876	0,810	0,694	0,641	0,614	0,564	66,054
7,0000	1,255	1,356	1,107	0,992	0,916	0,871	0,788	0,729	0,631	0,580	0,557	0,512	77,033
8,0000	1,125	1,218	0,998	0,898	0,831	0,791	0,719	0,664	0,577	0,532	0,511	0,471	88,072
9,0000	1,022	1,106	0,910	0,822	0,762	0,725	0,660	0,611	0,532	0,492	0,472	0,437	99,081
10,0000	0,936	1,013	0,838	0,760	0,704	0,671	0,611	0,567	0,494	0,458	0,441	0,408	110,09
11,0000	0,865	0,937	0,776	0,706	0,655	0,625	0,569	0,530	0,463	0,430	0,415	0,383	121,10
12,0000	0,804	0,871	0,724	0,660	0,613	0,586	0,534	0,498	0,435	0,405	0,391	0,361	132,11

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	5,050	2,155	1,427	1,341	1,192	0,786	0,482	0,342	0,226	1,806	2,297	1,753	0,1376
0,0160	5,607	2,365	1,589	1,495	1,329	0,897	0,556	0,396	0,263	2,031	2,584	1,952	0,1761
0,0200	6,098	2,504	1,732	1,632	1,460	1,014	0,632	0,460	0,308	2,252	2,863	2,128	0,2202
0,0250	6,628	2,630	1,889	1,781	1,611	1,156	0,739	0,539	0,390	2,495	3,175	2,320	0,2752
0,0320	7,347	2,788	2,066	1,967	1,797	1,347	0,875	0,659	0,459	2,801	3,572	2,564	0,3523
0,0400	8,029	2,919	2,236	2,152	1,982	1,548	1,026	0,786	0,558	3,104	3,959	2,804	0,4404
0,0500	8,772	3,085	2,435	2,369	2,205	1,778	1,198	0,933	0,676	3,429	4,373	3,079	0,5504
0,0600	9,553	3,269	2,651	2,563	2,423	1,993	1,356	1,067	0,784	3,721	4,751	3,341	0,6605
0,0700	10,288	3,484	2,853	2,771	2,628	2,191	1,493	1,187	0,877	3,988	5,086	3,605	0,7706
0,0800	11,035	3,705	2,056	2,970	2,827	2,376	1,628	1,297	0,964	4,236	5,397	3,867	0,8807
0,0900	11,717	3,931	3,251	3,168	3,017	2,545	1,749	1,399	1,036	4,462	5,674	4,119	0,9908
0,1000	12,444	4,175	3,461	3,352	3,189	2,703	1,867	1,486	1,102	4,668	5,936	4,362	1,1009
0,1250	14,206	4,741	3,918	3,775	3,607	3,045	2,097	1,671	1,242	5,131	6,530	4,934	1,3761
0,1600	16,461	5,488	4,504	4,340	4,117	3,430	2,352	1,873	1,390	5,674	7,209	5,685	1,7614
0,2000	18,590	6,172	5,055	4,854	4,589	3,729	2,537	2,014	1,488	6,111	7,754	6,380	2,2018
0,2500	20,664	6,840	5,547	5,341	4,987	3,942	2,665	2,089	1,536	6,458	8,185	7,046	2,7522
0,3200	22,583	7,372	5,995	5,722	5,235	4,011	2,676	2,087	1,525	6,699	8,508	7,596	3,5229
0,4000	23,499	7,758	6,161	5,856	5,302	3,958	2,617	2,037	1,484	6,752	8,598	7,818	4,4036
0,5000	23,686	7,871	6,115	5,818	5,205	3,828	2,525	1,971	1,437	6,657	8,498	7,804	5,5045
0,6000	23,057	7,734	5,853	5,563	4,971	3,635	2,411	1,881	1,376	6,398	8,210	7,505	6,6054
0,7000	21,790	7,488	5,508	5,235	4,684	3,421	2,289	1,782	1,317	6,086	7,822	7,073	7,7063
0,8000	20,346	7,140	5,161	4,922	4,398	3,216	2,177	1,698	1,262	5,767	7,403	6,634	8,8072
0,9000	18,945	6,752	4,838	4,611	4,100	3,024	2,064	1,631	1,211	5,463	7,006	6,204	9,9081
1,0000	17,787	6,432	4,590	4,356	3,881	2,874	1,980	1,577	1,171	5,191	6,649	5,848	11,009
1,2500	15,386	5,761	4,102	3,916	3,480	2,610	1,833	1,480	1,118	4,634	5,885	5,191	13,761
1,6000	12,771	5,001	3,611	3,453	3,091	2,359	1,692	1,376	1,065	4,026	5,038	4,487	17,614
2,0000	10,557	4,327	3,208	3,055	2,764	2,147	1,568	1,288	1,012	3,519	4,335	3,889	22,018
2,5000	8,542	3,672	2,805	2,669	2,463	1,948	1,446	1,205	0,958	3,042	3,681	3,322	27,522
3,2000	6,796	3,019	2,394	2,285	2,122	1,718	1,307	1,087	0,872	2,569	3,062	2,786	35,229
4,0000	5,515	2,493	2,039	1,955	1,838	1,504	1,153	0,971	0,785	2,182	2,572	2,351	44,036
5,0000	4,532	2,059	1,723	1,659	1,563	1,295	1,007	0,851	0,698	1,844	2,159	1,978	55,045
6,0000	3,871	1,760	1,496	1,439	1,363	1,138	0,889	0,755	0,622	1,598	1,866	1,709	66,054
7,0000	3,398	1,543	1,326	1,278	1,209	1,016	0,799	0,682	0,563	1,416	1,648	1,514	77,063
8,0000	3,034	1,373	1,193	1,151	1,087	0,917	0,722	0,619	0,514	1,272	1,477	1,361	88,072
9,0000	2,740	1,245	1,084	1,047	0,990	0,837	0,660	0,567	0,473	1,154	1,339	1,235	99,081
10,0000	2,504	1,143	0,997	0,963	0,911	0,771	0,609	0,523	0,438	1,059	1,226	1,134	110,09
11,0000	2,306	1,057	0,925	0,893	0,845	0,714	0,566	0,487	0,408	0,979	1,133	1,050	121,10
12,0000	2,136	0,984	0,862	0,833	0,788	0,666	0,529	0,455	0,382	0,911	1,052	0,977	132,11

Таблица 42.10. **Пробег R, мг/см², ионов бора $^{11}_{5}B^{+}$ в различных веществах [1]**
E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,082	0,093	0,130	0,199	0,237	0,278	0,307	0,341	0,535	0,633	0,691	0,824	0,1376
0,0160	0,097	0,111	0,155	0,236	0,282	0,329	0,361	0,400	0,627	0,740	0,808	0,961	0,1761
0,0200	0,113	0,130	0,181	0,274	0,329	0,381	0,418	0,461	0,722	0,851	0,929	1,103	0,2202
0,0250	0,131	0,152	0,210	0,318	0,382	0,440	0,481	0,530	0,829	0,977	1,065	1,263	0,2752
0,0320	0,154	0,179	0,247	0,373	0,449	0,514	0,562	0,617	0,965	1,135	1,237	1,463	0,3523
0,0400	0,177	0,206	0,285	0,429	0,517	0,590	0,644	0,706	1,104	1,297	1,413	1,668	0,4404
0,0500	0,203	0,238	0,328	0,493	0,595	0,676	0,737	0,806	1,261	1,478	1,610	1,898	0,5504
0,0600	0,227	0,266	0,367	0,551	0,666	0,754	0,821	0,897	1,404	1,643	1,788	2,105	0,6605
0,0700	0,250	0,293	0,404	0,606	0,732	0,827	0,900	0,982	1,536	1,794	1,951	2,295	0,7706
0,0800	0,272	0,318	0,439	0,657	0,794	0,895	0,974	1,062	1,659	1,935	2,103	2,472	0,8807
0,0900	0,293	0,342	0,473	0,707	0,854	0,961	1,045	1,139	1,776	2,069	2,246	2,649	0,9908
0,1000	0,313	0,365	0,506	0,754	0,911	1,024	1,114	1,212	1,887	2,197	2,384	2,800	1,1009
0,1250	0,363	0,420	0,585	0,867	1,046	1,173	1,276	1,386	2,148	2,495	2,705	3,172	1,3761
0,1600	0,429	0,490	0,690	1,015	1,223	1,369	1,489	1,613	2,485	2,879	3,115	3,643	1,7614
0,2000	0,505	0,566	0,808	1,178	1,416	1,582	1,721	1,860	2,844	3,288	3,550	4,142	2,2018
0,2500	0,599	0,657	0,952	1,375	1,649	1,838	2,001	2,159	3,272	3,772	4,066	4,733	2,7522
0,3200	0,733	0,783	1,155	1,647	1,967	2,188	2,384	2,568	3,847	4,421	4,758	5,522	3,5229
0,4000	0,891	0,926	1,387	1,954	2,326	2,580	2,814	3,028	4,485	5,138	5,522	6,391	4,4036
0,5000	1,094	1,109	1,682	2,337	2,770	3,065	3,346	3,598	5,262	6,011	6,450	7,447	5,5045
0,6000	1,306	1,297	1,981	2,723	3,213	3,547	3,877	4,168	6,028	6,869	7,361	8,477	6,6054
0,7000	1,527	1,493	2,288	3,113	3,660	4,032	4,411	4,742	6,792	7,723	8,267	9,498	7,7063
0,8000	1,756	1,698	2,602	3,508	4,112	4,521	4,952	5,321	7,557	8,577	9,171	10,517	8,8072
0,9000	1,994	1,913	2,924	3,910	4,569	5,014	5,498	5,908	8,325	9,432	10,077	11,534	9,9081
1,0000	2,241	2,137	3,253	4,319	5,033	5,514	6,051	6,503	9,098	10,291	10,986	12,553	11,009
1,2500	2,897	2,743	4,114	5,377	6,225	6,796	7,472	8,032	11,061	12,471	13,291	15,131	13,761
1,6000	3,915	3,703	5,417	6,951	7,991	8,689	9,572	10,300	13,919	15,634	16,637	18,864	17,614
2,0000	5,226	4,957	7,059	8,903	10,169	11,016	12,161	13,099	17,393	19,455	20,680	23,361	22,018
2,5000	7,099	6,749	9,355	11,595	13,155	14,196	15,713	16,929	22,088	24,609	26,120	29,379	27,522
3,2000	10,171	9,668	13,044	15,861	17,856	19,196	21,296	22,955	29,361	32,581	34,519	38,631	35,229
4,0000	14,329	13,588	17,947	21,467	23,995	25,719	28,553	30,811	38,706	42,792	45,256	50,442	44,036
5,0000	20,491	19,355	25,105	29,577	32,825	35,087	38,947	42,063	51,920	57,249	60,384	67,044	55,045
6,0000	27,704	26,073	33,392	38,899	42,937	45,778	50,801	54,880	66,877	73,542	77,396	85,620	66,054
7,0000	35,955	33,730	42,790	49,410	54,320	57,772	64,073	69,225	83,536	91,629	96,264	106,135	77,063
8,0000	45,234	42,310	53,279	61,090	66,950	71,057	78,722	85,069	101,808	113,474	116,930	128,568	88,072
9,0000	55,513	51,808	64,842	73,916	80,797	85,610	94,725	102,378	121,692	133,025	139,359	152,858	99,081
10,0000	66,777	62,217	77,463	87,862	95,849	101,406	112,085	121,103	143,173	156,245	163,489	178,960	110,09
11,0000	79,021	73,524	91,128	102,902	112,077	118,422	130,777	141,196	166,215	181,065	189,220	206,844	121,10
12,0000	92,230	85,719	105,822	119,031	129,455	136,629	150,768	162,631	190,765	207,444	216,556	236,498	132,11

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	C	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	0,030	0,077	0,113	0,120	0,135	0,211	0,362	0,533	0,832	0,090	0,070	0,088	0,1376
0,0160	0,036	0,093	0,137	0,145	0,162	0,253	0,429	0,627	0,974	0,109	0,085	0,107	0,1761
0,0200	0,043	0,110	0,162	0,171	0,192	0,295	0,497	0,722	1,116	0,128	0,100	0,127	0,2202
0,0250	0,052	0,131	0,191	0,202	0,226	0,343	0,572	0,825	1,265	0,150	0,118	0,150	0,2752
0,0320	0,062	0,159	0,228	0,242	0,269	0,402	0,664	0,949	1,438	0,179	0,140	0,181	0,3523
0,0400	0,073	0,189	0,268	0,283	0,314	0,461	0,754	1,067	1,606	0,208	0,163	0,213	0,4404
0,0500	0,086	0,225	0,314	0,331	0,365	0,526	0,850	1,192	1,780	0,241	0,189	0,249	0,5504
0,0600	0,098	0,259	0,356	0,374	0,412	0,584	0,935	1,300	1,929	0,271	0,212	0,283	0,6605
0,0700	0,109	0,291	0,396	0,415	0,455	0,636	1,011	1,397	2,060	0,299	0,235	0,314	0,7706
0,0800	0,119	0,321	0,432	0,453	0,495	0,684	1,082	1,485	2,179	0,326	0,256	0,343	0,8807
0,0900	0,129	0,350	0,467	0,489	0,533	0,728	1,147	1,567	2,289	0,351	0,275	0,371	0,9908
0,1000	0,138	0,377	0,500	0,523	0,568	0,770	1,208	1,643	2,392	0,376	0,294	0,397	1,1009
0,1250	0,158	0,439	0,575	0,600	0,649	0,866	1,347	1,818	2,627	0,432	0,339	0,456	1,3761
0,1600	0,184	0,514	0,666	0,695	0,749	0,985	1,520	2,035	2,920	0,503	0,395	0,528	1,7614
0,2000	0,209	0,590	0,758	0,790	0,850	1,108	1,700	2,261	3,226	0,578	0,453	0,601	2,2018
0,2500	0,237	0,674	0,862	0,898	0,965	1,251	1,911	2,530	3,589	0,665	0,522	0,683	2,7522
0,3200	0,272	0,783	0,996	1,038	1,115	1,445	2,199	2,898	4,092	0,782	0,615	0,789	3,5229
0,4000	0,311	0,899	1,141	1,190	1,283	1,666	2,532	3,325	4,678	0,913	0,718	0,903	4,4036
0,5000	0,357	1,040	1,320	1,378	1,492	1,949	2,960	3,875	5,432	1,077	0,846	1,044	5,5045

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,6000	0,404	1,181	1,504	1,572	1,709	2,244	3,407	4,446	6,215	1,246	0,978	1,188	6,6054
0,7000	0,453	1,326	1,698	1,776	1,937	2,556	3,875	5,048	7,033	1,422	1,116	1,339	7,7063
0,8000	0,506	1,476	1,904	1,993	2,179	2,888	4,368	5,681	7,887	1,608	1,260	1,500	8,8072
0,9000	0,562	1,635	2,125	2,224	2,438	3,241	4,888	6,342	8,777	1,804	1,413	1,671	9,9081
1,0000	0,622	1,802	2,358	2,470	2,714	3,615	5,433	7,029	9,702	2,011	1,574	1,854	11,009
1,2500	0,788	2,254	2,993	3,136	3,464	4,620	6,877	8,830	12,107	2,572	2,014	2,354	13,761
1,6000	1,063	2,973	3,994	4,184	4,639	6,173	9,066	11,531	15,638	3,465	2,723	3,152	17,614
2,0000	1,443	3,920	5,289	5,542	6,147	8,131	11,770	14,840	19,879	4,636	3,666	4,208	22,018
2,5000	2,024	5,303	7,127	7,472	8,259	10,826	15,429	19,263	25,472	6,321	5,046	5,742	27,522
3,2000	3,039	7,625	10,110	10,601	11,638	15,047	21,045	26,010	33,918	9,086	7,348	8,282	35,229
4,0000	4,482	10,845	14,108	14,780	16,110	20,540	28,238	34,601	44,585	12,816	10,497	11,734	44,036
5,0000	6,693	15,722	20,002	20,914	22,626	28,453	38,482	46,751	59,491	18,323	15,185	16,857	55,045
6,0000	9,329	21,521	26,877	28,058	30,188	37,544	50,145	60,514	76,320	24,753	20,685	22,861	66,054
7,0000	12,370	28,216	34,709	36,191	38,782	47,803	63,232	75,881	94,854	32,087	26,976	29,718	77,063
8,0000	15,804	35,793	43,476	45,281	48,401	59,223	77,750	92,852	115,339	40,304	34,042	37,400	88,072
9,0000	19,627	44,224	53,168	55,323	59,024	71,798	93,721	111,457	137,682	49,402	41,879	45,902	99,081
10,0000	23,834	53,460	63,765	66,298	70,624	85,517	111,105	131,683	161,883	59,372	50,480	55,213	110,09
11,0000	28,420	63,482	75,238	78,180	83,183	100,369	129,874	153,510	187,959	70,195	59,830	65,313	121,10
12,0000	33,384	74,283	87,576	90,957	96,689	116,341	150,003	176,908	215,894	81,862	69,922	76,189	132,11

Таблица 42.11. **Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см$^{-2}$), для ионов углерода $^{12}_{6}C^{+}$ [1]**

E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	2,558	2,116	1,550	1,031	0,837	0,760	0,704	0,651	0,414	0,354	0,326	0,279	0,1500
0,0160	2,894	2,394	1,754	1,166	0,947	0,859	0,796	0,737	0,468	0,401	0,368	0,316	0,1920
0,0200	3,236	2,677	1,961	1,304	1,059	0,961	0,890	0,824	0,524	0,448	0,412	0,353	0,2400
0,0250	3,618	2,993	2,192	1,458	1,184	1,074	0,995	0,921	0,585	0,501	0,462	0,395	0,3000
0,0320	4,088	3,388	2,481	1,650	1,342	1,220	1,126	1,042	0,662	0,568	0,523	0,449	0,3840
0,0400	4,559	3,797	2,773	1,850	1,509	1,376	1,267	1,173	0,746	0,642	0,591	0,508	0,4800
0,0500	5,042	4,226	3,078	2,062	1,690	1,539	1,419	1,314	0,834	0,725	0,668	0,574	0,6000
0,0600	5,455	4,616	3,342	2,253	1,852	1,681	1,554	1,441	0,922	0,802	0,740	0,637	0,7200
0,0700	5,806	4,967	3,573	2,423	2,001	1,815	1,679	1,558	1,000	0,875	0,811	0,697	0,8400
0,0800	6,108	5,293	3,775	2,578	2,133	1,933	1,786	1,661	1,076	0,944	0,872	0,751	0,9600
0,0900	6,365	5,587	3,951	2,718	2,252	2,047	1,885	1,754	1,150	1,006	0,932	0,804	1,0800
0,1000	6,587	5,856	4,104	2,844	2,364	2,142	1,970	1,843	1,215	1,063	0,985	0,850	1,2000
0,1250	6,991	6,450	4,397	3,095	2,585	2,344	2,155	2,018	1,352	1,183	1,106	0,956	1,5000
0,1600	7,286	7,082	4,644	3,325	2,796	2,536	2,327	2,183	1,486	1,305	1,224	1,068	1,9200
0,2000	7,407	7,518	4,785	3,479	2,943	2,665	2,445	2,292	1,589	1,402	1,316	1,148	2,4000
0,2500	7,402	7,786	4,860	3,592	3,052	2,770	2,537	2,377	1,677	1,482	1,390	1,215	3,0000
0,3200	7,294	7,925	4,889	3,681	3,144	2,870	2,616	2,444	1,750	1,555	1,459	1,283	3,8400
0,4000	7,140	7,926	4,884	3,721	3,204	2,930	2,671	2,496	1,817	1,617	1,519	1,333	4,8000
0,5000	6,950	7,810	4,860	3,757	3,256	2,989	2,722	2,537	1,876	1,672	1,572	1,385	6,0000
0,6000	6,692	7,537	4,773	3,738	3,255	2,998	2,721	2,535	1,895	1,695	1,597	1,418	7,2000
0,7000	6,456	7,247	4,682	3,698	3,235	2,982	2,701	2,519	1,901	1,699	1,606	1,423	8,4000
0,8000	6,229	6,944	4,587	3,655	3,206	2,967	2,683	2,500	1,899	1,706	1,610	1,431	9,6000
0,9000	6,025	6,658	4,490	3,601	3,174	2,945	2,658	2,474	1,899	1,706	1,612	1,437	10,800
1,0000	5,828	6,382	4,392	3,553	3,136	2,912	2,631	2,446	1,889	1,700	1,607	1,436	12,000
1,2500	5,382	5,764	4,150	3,403	3,029	2,822	2,544	2,361	1,855	1,672	1,581	1,415	15,000
1,6000	4,844	5,077	3,826	3,195	2,854	2,667	2,403	2,219	1,779	1,611	1,523	1,366	19,200
2,0000	4,327	4,515	3,492	2,958	2,657	2,493	2,235	2,071	1,676	1,529	1,446	1,303	24,000
2,5000	3,799	3,981	3,132	2,690	2,434	2,286	2,045	1,898	1,560	1,419	1,347	1,222	30,000
3,2000	3,240	3,423	2,725	2,371	2,158	2,030	1,820	1,684	1,406	1,286	1,221	1,109	38,400
4,0000	2,770	2,950	2,368	2,081	1,906	1,795	1,617	1,492	1,262	1,156	1,101	1,002	48,000
5,0000	2,347	2,516	2,034	1,802	1,660	1,566	1,412	1,306	1,119	1,021	0,978	0,893	60,000
6,0000	2,041	2,194	1,784	1,591	1,468	1,392	1,256	1,161	0,995	0,919	0,880	0,808	72,000
7,0000	1,804	1,948	1,590	1,425	1,317	1,252	1,132	1,048	0,907	0,833	0,800	0,736	84,000
8,0000	1,619	1,752	1,436	1,293	1,196	1,137	1,034	0,955	0,830	0,766	0,735	0,678	96,000
9,0000	1,472	1,592	1,310	1,183	1,097	1,044	0,950	0,879	0,767	0,708	0,680	0,629	108,00
10,0000	1,348	1,459	1,206	1,094	1,013	0,966	0,879	0,816	0,712	0,660	0,636	0,587	120,00
11,0000	1,245	1,349	1,118	1,017	0,943	0,900	0,819	0,763	0,666	0,619	0,598	0,551	132,00
12,0000	1,158	1,254	1,042	0,950	0,883	0,843	0,768	0,717	0,626	0,584	0,563	0,519	144,00

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	5,814	2,481	1,643	1,544	1,372	0,905	0,555	0,394	0,260	2,079	2,645	2,019	0,1500
0,0160	6,455	2,722	1,829	1,721	1,529	1,033	0,640	0,456	0,303	2,338	2,975	2,247	0,1920
0,0200	7,020	2,883	1,994	1,879	1,681	1,167	0,728	0,529	0,354	2,592	3,296	2,449	0,2400
0,0250	7,630	3,028	2,175	2,050	1,855	1,331	0,851	0,620	0,449	2,872	3,655	2,670	0,3000
0,0320	8,459	3,210	2,379	2,265	2,069	1,550	1,007	0,759	0,528	3,225	4,113	2,952	0,3840
0,0400	9,291	3,378	2,587	2,490	2,294	1,792	1,187	0,910	0,646	3,591	4,582	3,245	0,4800
0,0500	10,188	3,583	2,829	2,752	2,561	2,065	1,391	1,083	0,785	3,983	5,079	3,577	0,6000
0,0600	11,163	3,820	3,098	2,995	2,831	2,330	1,584	1,247	0,916	4,348	5,551	3,904	0,7200
0,0700	12,113	4,102	3,359	3,262	3,094	2,580	1,758	1,397	1,033	4,695	5,989	4,245	0,8400
0,0800	13,100	4,398	3,628	3,526	3,356	2,820	1,933	1,540	1,144	5,028	6,406	4,591	0,9600
0,0900	14,027	4,706	3,892	3,793	3,611	3,046	2,094	1,675	1,241	5,342	6,792	4,931	1,0800
0,1000	15,021	5,040	4,178	4,047	3,850	3,263	2,253	1,793	1,330	5,635	7,166	5,265	1,2000
0,1250	17,456	5,826	4,815	4,639	4,432	3,742	2,577	2,053	1,526	6,305	8,024	6,063	1,5000
0,1600	20,573	6,859	5,628	5,424	5,146	4,286	2,940	2,341	1,737	7,091	9,009	7,105	1,9200
0,2000	23,495	7,800	6,388	6,135	5,800	4,713	3,206	2,546	1,881	7,723	9,800	8,063	2,4000
0,2500	26,341	8,719	7,071	6,809	6,357	5,025	3,397	2,663	1,959	8,233	10,434	8,981	3,0000
0,3200	29,040	9,480	7,710	7,358	6,732	5,158	3,442	2,684	1,960	8,614	10,941	9,768	3,8400
0,4000	30,475	10,061	7,990	7,594	6,876	5,133	3,394	2,642	1,924	8,757	11,150	10,139	4,8000
0,5000	31,007	10,303	8,004	7,616	6,814	5,011	3,305	2,581	1,881	8,714	11,125	10,216	6,0000
0,6000	30,311	10,167	7,695	7,313	6,535	4,778	3,170	2,473	1,809	8,411	10,793	9,867	7,2000
0,7000	28,745	9,878	7,266	6,905	6,180	4,513	3,020	2,350	1,737	8,029	10,318	9,330	8,4000
0,8000	26,923	9,448	6,829	6,513	5,820	4,256	2,880	2,247	1,669	7,632	9,797	8,779	9,6000
0,9000	25,142	8,961	6,420	6,119	5,441	4,014	2,739	2,164	1,607	7,251	9,298	8,234	10,800
1,0000	23,673	8,560	6,109	5,797	5,165	3,825	2,635	2,099	1,559	6,909	8,850	7,783	12,000
1,2500	20,623	7,722	5,498	5,249	4,664	3,498	2,457	1,984	1,498	6,212	7,888	6,959	15,000
1,6000	17,295	6,773	4,890	4,676	4,186	3,195	2,292	1,863	1,443	5,452	6,822	6,076	19,200
2,0000	14,457	5,926	4,393	4,183	3,785	2,940	2,148	1,763	1,386	4,819	5,936	5,325	24,000
2,5000	11,839	5,090	3,887	3,699	3,414	2,700	2,005	1,669	1,328	4,216	5,102	4,604	30,000
3,2000	9,538	4,238	3,360	3,208	2,979	2,412	1,834	1,526	1,224	3,605	4,298	3,911	38,400
4,0000	7,814	3,533	2,889	2,770	2,605	2,131	1,634	1,376	1,113	3,093	3,644	3,332	48,000
5,0000	6,468	2,939	2,459	2,368	2,231	1,849	1,438	1,214	0,997	2,632	3,081	2,823	60,000
6,0000	5,548	2,523	2,144	2,062	1,953	1,631	1,274	1,083	0,892	2,291	2,674	2,449	72,000
7,0000	4,883	2,217	1,905	1,837	1,737	1,460	1,148	0,980	0,810	2,034	2,368	2,176	84 000
8,0000	4,366	1,975	1,716	1,656	1,564	1,320	1,038	0,890	0,740	1,830	2,126	1,958	96,000
9,0000	3,945	1,793	1,561	1,507	1,426	1,206	0,950	0,816	0,681	1,662	1,928	1,778	108,00
10,0000	3,606	1,646	1,436	1,387	1,312	1,110	0,877	0,754	0,631	1,524	1,766	1,633	120,00
11,0000	3,320	1,522	1,331	1,285	1,216	1,028	0,815	0,701	0,587	1,409	1,631	1,511	132,00
12,0000	3.074	1.416	1.241	1,198	1.134	0,959	0,762	0,656	0.549	1,311	1.514	1.407	144,00

Таблица 42.12. **Пробег R, мг/см², ионов углерода $^{12}_{6}C^{+}$ в различных веществах [1]**
E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,075	0,085	0,119	0,181	0,216	0,255	0,282	0,313	0,491	0,581	0,635	0,758	0,1500
0,0160	0,089	0,102	0,143	0,216	0,258	0,302	0,332	0,368	0,576	0,681	0,744	0,886	0,1920
0,0200	0,104	0,120	0,167	0,252	0,302	0,350	0,385	0,425	0,665	0,785	0,857	1,019	0,2400
0,0250	0,121	0,140	0,194	0,293	0,351	0,406	0,444	0,490	0,766	0,903	0,985	1,169	0,3000
0,0320	0,143	0,165	0,229	0,345	0,414	0,476	0,520	0,572	0,893	1,051	1,146	1,357	0,3940
0,0400	0,164	0,191	0,264	0,398	0,478	0,547	0,597	0,655	1,024	1,203	1,311	1,549	0,4800
0,0500	0,189	0,221	0,304	0,457	0,551	0,627	0,684	0,749	1,171	1,373	1,495	1,764	0,6000
0,0600	0,212	0,247	0,341	0,512	0,617	0,700	0,763	0,834	1,304	1,526	1,661	1,957	0,7200
0,0700	0,233	0,272	0,375	0,562	0,678	0,767	0,836	0,913	1,426	1,666	1,812	2,133	0,8400
0,0800	0,253	0,296	0,408	0,609	0,735	0,830	0,904	0,986	1,539	1,795	1,952	2,295	0,9600
0,0900	0,272	0,318	0,439	0,655	0,789	0,891	0,968	1,056	1,645	1,916	2,083	2,447	1,0800
0,1000	0,291	0,339	0,468	0,698	0,841	0,948	1,030	1,123	1,747	2,032	2,208	2,592	1,2000
0,1250	0,335	0,387	0,539	0,799	0,962	1,082	1,176	1,278	1,981	2,299	2,494	2,925	1,5000
0,1600	0,394	0,449	0,631	0,929	1,118	1,253	1,363	1,478	2,276	2,636	2,854	3,339	1,9200
0,2000	0,459	0,515	0,733	1,070	1,285	1,438	1,564	1,692	2,588	2,991	3,232	3,771	2,4000
0,2500	0,540	0,593	0,857	1,240	1,485	1,658	1,804	1,949	2,955	3,406	3,675	4,279	3,0000
0,3200	0,654	0,700	1,030	1,471	1,756	1,956	2,130	2,297	3,445	3,959	4,264	4,951	3,8400
0,4000	0,787	0,821	1,226	1,730	2,058	2,287	2,493	2,685	3,983	4.564	4,909	5,684	4,8000

E_m, МэВ/а.е.м	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,5000	0,957	0,974	1,472	2,051	2,429	2,692	2,938	3,162	4,633	5,294	5,685	6,567	6,0000
0,6000	1,133	1,130	1,721	2,371	2,798	3,093	3,379	3,635	5,269	6,007	6,442	7,423	7,2000
0,7000	1,316	1,292	1,975	2,694	3,168	3,494	3,821	4,110	5,901	6,714	7,192	8,268	8,4000
0,8000	1,505	1,462	2,234	3,020	3,540	3,898	4,267	4,589	6,533	7,419	7,938	9,109	9,6000
0,9000	1,701	1,638	2,498	3,351	3,916	4,303	4,716	5,071	7,165	8,122	8,683	9,946	10,800
1,0000	1,903	1,822	2,769	3,686	4,297	4,713	5,170	5,559	7,798	8,827	9,428	10,781	12,000
1,2500	2,439	2,317	3,471	4,549	5,270	5,760	6,330	6,807	9,401	10,605	11,310	12,885	15,000
1,6000	3,262	3,094	4,526	5,823	6,698	7,291	8,029	8,642	11,713	13,164	14,016	15,905	19,200
2,0000	4,311	4,097	5,840	7,385	8,442	9,153	10,101	10,882	14,493	16,223	17,252	19,504	24,000
2,5000	5,793	5,514	7,656	9,514	10,803	11,668	12,910	13,911	18,206	20,299	21,555	24,264	30,000
3,2000	8,193	7,795	10,537	12,846	14,476	15,574	17,271	18,618	23,888	26,527	28,116	31,492	38,400
4,0000	11,405	10,823	14,325	17,178	19,219	20,614	22,878	24,678	31,108	34,416	36,411	40,617	48,000
5,0000	16,125	15,240	19,809	23,391	25,984	27,791	30,841	33,308	41,232	45,491	48,001	53,336	60,000
6,0000	21,621	20,359	26,123	30,493	33,687	35,936	39,873	43,073	52,627	57,905	60,963	67,489	72,000
7,0000	27,887	26,173	33,259	38,475	42,332	45,044	49,951	53,967	65,278	71,640	75,291	83,068	84,000
8,0000	34,921	32,678	41,210	47,329	51,905	55,114	61,055	65,977	79,129	86,683	90,956	100,073	96,000
9,0000	42,705	39,870	49,967	57,042	62,392	66,136	73,175	79,085	94,186	103,004	107,942	118,468	108,00
10,0000	51,232	47,750	59,521	67,599	73,786	78,093	86,316	93,260	110,448	120,581	126,208	138,227	120,00
11,0000	60,500	56,310	69,865	78,984	86,071	90,974	100,466	108,470	127,890	139,370	145,686	159,335	132,00
12,0000	70,501	65,543	80,991	91,197	99,229	104,760	115,603	124,700	146,479	159,344	166,385	181,788	144,00

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	0,027	0,070	0,103	0,109	0,122	0,192	0,330	0,487	0,762	0,082	0,064	0,080	0,1500
0,0160	0,033	0,085	0,125	0,133	0,148	0,231	0,392	0,574	0,894	0,100	0,078	0,097	0,1920
0,0200	0,040	0,102	0,148	0,157	0,176	0,271	0,456	0,663	1,026	0,118	0,092	0,116	0,2400
0,0250	0,048	0,121	0,175	0,186	0,207	0,315	0,526	0,760	1,166	0,139	0,108	0,138	0,3000
0,0320	0,057	0,147	0,210	0,223	0,248	0,371	0,612	0,876	1,329	0,165	0,129	0,167	0,3840
0,0400	0,068	0,175	0,248	0,262	0,290	0,426	0,696	0,987	1,486	0,192	0,151	0,197	0,4800
0,0500	0,080	0,209	0,291	0,306	0,338	0,487	0,787	1,104	1,649	0,223	0,175	0,231	0,6000
0,0600	0,091	0,241	0,330	0,347	0,382	0,541	0,866	1,205	1,788	0,252	0,197	0,262	0,7200
0,0700	0,101	0,270	0,367	0,385	0,422	0,589	0,936	1,294	1,909	0,278	0,218	0,291	0,8400
0,0800	0,110	0,298	0,401	0,420	0,458	0,633	1,000	1,376	2,019	0,302	0,237	0,318	0,9600
0,0900	0,119	0,325	0,433	0,452	0,493	0,673	1,060	1,451	2,120	0,325	0,255	0,343	1,0800
0,1000	0,127	0,349	0,463	0,483	0,525	0,711	1,115	1,520	2,213	0,347	0,273	0,367	1,2000
0,1250	0,146	0,405	0,529	0,552	0,597	0,797	1,239	1,676	2,424	0,397	0,312	0,420	1,5000
0,1600	0,168	0,471	0,610	0,636	0,685	0,902	1,392	1,867	2,681	0,460	0,361	0,483	1,9200
0,2000	0,190	0,536	0,690	0,719	0,773	1,008	1,548	2,063	2,946	0,525	0,412	0,547	2,4000
0,2500	0,214	0,609	0,779	0,811	0,871	1,131	1,729	2,293	3,258	0,600	0,471	0,617	3,0000
0,3200	0,244	0,701	0,892	0,930	1,000	1,296	1,975	2,607	3,686	0,700	0,550	0,707	3,8400
0,4000	0,276	0,799	1,015	1,058	1,141	1,483	2,256	2,968	4,181	0,810	0,637	0,803	4,8000
0,5000	0,315	0,917	1,165	1,216	1,316	1,719	2,614	3,427	4,811	0,947	0,745	0,921	6,0000
0,6000	0,354	1,035	1,318	1,377	1,496	1,965	2,984	3,902	5,462	1,088	0,854	1,041	7,2000
0,7000	0,395	1,154	1,478	1,546	1,685	2,223	3,372	4,400	6,139	1,234	0,968	1,166	8,4000
0,8000	0,438	1,278	1,648	1,725	1,885	2,497	3,779	4,922	6,843	1,387	1,087	1,298	9,6000
0,9000	0,484	1,409	1,830	1,915	2,098	2,787	4,206	5,466	7,576	1,548	1,213	1,439	10,800
1,0000	0,534	1,546	2,021	2,116	2,324	3,093	4,653	6,029	8,334	1,718	1,345	1,589	12,000
1,2500	0,669	1,915	2,539	2,660	2,936	3,913	5,832	7,499	10,297	2,176	1,704	1,997	15,000
1,6000	0,892	2,496	3,349	3,508	3,887	5,170	7,603	9,684	13,153	2,898	2,277	2,643	19,200
2,0000	1,196	3,254	4,386	4,594	5,093	6,737	9,767	12,333	16,548	3,835	3,032	3,488	24,000
2,5000	1,655	4,348	5,839	6,121	6,764	8,868	12,661	15,831	20,971	5,168	4,124	4,701	30,000
3,2000	2,448	6,162	8,169	8,565	9,404	12,166	17,048	21,102	27,570	7,327	5,922	6,685	38,400
4,0000	3,563	8,650	11,258	11,794	12,858	16,410	22,605	27,739	35,811	10,210	8,354	9,352	48,000
5,0000	5,256	12,386	15,774	16,493	17,850	22,472	30,454	37,047	47,231	14,429	11,946	13,277	60,000
6,0000	7,265	16,804	21,011	21,936	23,611	29,398	39,339	47,534	59,984	19,327	16,136	17,851	72,000
7,0000	9,574	21,888	26,959	28,113	30,138	37,189	49,278	59,203	74,127	24,896	20,914	23,058	84,000
8,0000	12,177	27,631	33,604	35,003	37,429	45,845	60,283	72,068	89,655	31,125	26,270	28,881	96,000
9,0000	15,072	34,016	40,944	42,607	45,474	55,369	72,377	86,157	106,576	38,015	32,205	35,320	108,00
10,0000	18,257	41,008	48,966	50,915	54,255	65,754	85,537	101,468	124,896	45,562	38,716	42,369	120,00
11,0000	21,728	98,594	57,651	59,910	63,763	76,997	99,745	117,991	144,635	53,755	45,793	50,014	132,00
12,0000	25,487	56,772	66,993	69,585	73,989	89,090	114,986	135,707	165,787	62,589	53,435	58,249	144,00

Таблица 42.13. **Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см$^{-2}$), для ионов азота $^{14}_{7}N^{+}$ [1]**

Em — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

Em, МэВ/а. е. м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	2,972	2,458	1,801	1,198	0,973	0,882	0,818	0,756	0,481	0,412	0,378	0,324	0,1750
0,0160	3,362	2,781	2,038	1,355	1,100	0,998	0,925	0,856	0,544	0,466	0,428	0,367	0,2240
0,0200	3,759	3,110	2,278	1,515	1,230	1,116	1,034	0,957	0,608	0,521	0,478	0,410	0,2801
0,0250	4,202	3,477	2,547	1,694	1,375	1,248	1,156	1,070	0,680	0,582	0,536	0,458	0,3501
0,0320	4,749	3,936	2,881	1,916	1,559	1,418	1,308	1,210	0,769	0,660	0,608	0,522	0,4481
0,0400	5,296	4,410	3,222	2,149	1,753	1,598	1,472	1,363	0,867	0,746	0,686	0,590	0,5601
0,0500	5,843	4,898	3,567	2,390	1,958	1,784	1,644	1,523	0,967	0,840	0,774	0,665	0,7001
0,0600	6,306	5,337	3,864	2,604	2,141	1,944	1,797	1,665	1,067	0,927	0,856	0,736	0,8402
0,0700	6,700	5,731	4,123	2,795	2,309	2,094	1,938	1,798	1,154	1,010	0,936	0,804	0,9802
0,0800	7,038	6,099	4,350	2,971	2,458	2,227	2,058	1,914	1,240	1,088	1,005	0,866	1,1202
0,0900	7,331	6,435	4,551	3,131	2,594	2,357	2,171	2,020	1,324	1,158	1,074	0,926	1,2603
0,1000	7,589	6,748	4,729	3,277	2,724	2,468	2,270	2,123	1,400	1,225	1,135	0,979	1,4003
0,1250	8,096	7,470	5,092	3,585	2,994	2,714	2,495	2,337	1,566	1,370	1,281	1,107	1,7504
0,1600	8,557	8,317	5,454	3,905	3,283	2,978	2,732	2,563	1,745	1,533	1,437	1,254	2,2405
0,2000	8,862	8,994	5,725	4,162	3,521	3,189	2,925	2,742	1,901	1,677	1,574	1,374	2,8006
0,2500	9,030	9,498	5,929	4,382	3,723	3,380	3,095	2,899	2,046	1,808	1,696	1,482	3,5008
0,3200	9,058	9,841	6,071	4,571	3,904	3,564	3,248	3,035	2,173	1,931	1,812	1,594	4,4810
0,4000	8,958	9,944	6,127	4,669	4,019	3,676	3,352	3,131	2,279	2,028	1,906	1,673	5,6012
0,5000	8,759	9,843	6,125	4,735	4,104	3,767	3,430	3,197	2,364	2,107	1,981	1,746	7,0015
0,6000	8,476	9,546	6,046	4,734	4,123	3,797	3,446	3,210	2,400	2,146	2,022	1,796	8,4018
0,7000	8,209	9,215	5,953	4,703	4,114	3,792	3,435	3,203	2,417	2,161	2,042	1,810	9,8021
0,8000	7,947	8,860	5,852	4,664	4,091	3,786	3,424	3,189	2,423	2,177	2,054	1,826	11,202
0,9000	7,710	8,520	5,745	4,608	4,062	3,769	3,401	3,166	2,430	2,183	2,063	1,839	12,603
1,0000	7,478	8,188	5,635	4,559	4,023	3,736	3,375	3,139	2,423	2,181	2,062	1,843	14,003
1,2500	6,943	7,435	5,353	4,389	3,908	3,640	3,281	3,046	2,393	2,157	2,039	1,825	17,504
1,6000	6,286	6,589	4,966	4,146	3,704	3,461	3,118	2,880	2,309	2,090	1,976	1,773	22,405
2,0000	5,646	5,892	4,557	3,860	3,468	3,254	2,916	2,702	2,187	1,996	1,887	1,700	28,006
2,5000	4,986	5,225	4,111	3,531	3,194	3,001	2,684	2,491	2,047	1,862	1,768	1,603	35,007
3,2000	4,281	4,522	3,600	3,132	2,851	2,682	2,405	2,225	1,858	1,699	1,613	1,465	44,810
4,0000	3,682	3,921	3,147	2,766	2,533	2,386	2,150	1,983	1,677	1,536	1,463	1,331	56,012
5,0000	3,138	3,364	2,719	2,409	2,219	2,094	1,887	1,746	1,496	1,365	1,308	1,194	70,015
6,0000	2,742	2,948	2,397	2,138	1,973	1,869	1,687	1,560	1,337	1,234	1,182	1,086	84,018
7,0000	2,433	2,628	2,145	1,922	1,776	1,688	1,527	1,414	1,223	1,124	1,079	0,993	98,021
8,0000	2,191	2,372	1,944	1,750	1,619	1,540	1,400	1,293	1,124	1,036	0,995	0,918	112,02
9,0000	1,998	2,162	1,779	1,606	1,489	1,418	1,290	1,194	1,041	0,961	0,923	0,854	126,03
10,0000	1,835	1,986	1,641	1,489	1,379	1,315	1,197	1,111	0,968	0,898	0,865	0,799	140,03
11,0000	1,699	1,841	1,525	1,388	1,278	1,228	1,118	1,042	0,909	0,845	0,816	0,752	154,03
12,0000	1,583	1,714	1,425	1,299	1,207	1,153	1,050	0,980	0,856	0,798	0,769	0,710	168,04

Em, МэВ/ а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	6,754	2,881	1,909	1,794	1,594	1,052	0,645	0,457	0,302	2,415	3,072	2,347	0,1750
0,0160	7,498	3,162	2,125	1,999	1,777	1,200	0,744	0,530	0,352	2,716	3,456	2,610	0,2240
0,0200	8,155	3,349	2,317	2,182	1,952	1,355	0,845	0,615	0,411	3,012	3,829	2,845	0,2801
0,0250	8,863	3,517	2,527	2,381	2,155	1,546	0,988	0,721	0,522	3,336	4,246	3,102	0,3501
0,0320	9,826	3,729	2,763	2,631	2,403	1,801	1,170	0,882	0,614	3,746	4,778	3,429	0,4481
0,0400	10,792	3,924	3,006	2,893	2,664	2,081	1,379	1,057	0,751	4,172	5,322	3,769	0,5601
0,0500	11,807	4,152	3,278	3,189	2,968	2,394	1,612	1,256	0,910	4,616	5,886	4,145	0,7001
0,0600	12,907	4,417	3,582	3,462	3,273	2,693	1,832	1,441	1,059	5,027	6,418	4,513	0,8402
0,0700	13,977	4,733	3,876	3,764	3,570	2,977	2,028	1,612	1,192	5,417	6,910	4,898	0,9802
0,0800	15,095	5,068	4,180	4,063	3,867	3,249	2,227	1,775	1,318	5,794	7,382	5,290	1,1202
0,0900	16,155	5,420	4,482	4,369	4,159	3,509	2,412	1,929	1,429	6,152	7,823	5,679	1,2603
0,1000	17,306	5,807	4,814	4,662	4,435	3,759	2,596	2,066	1,532	6,492	8,256	6,067	1,4003
0,1250	20,214	6,747	5,576	5,372	5,133	4,333	2,984	2,378	1,767	7,302	9,293	7,022	1,7504
0,1600	24,160	8,055	6,610	6,370	6,043	5,034	3,452	2,749	2,040	8,328	10,580	8,344	2,2405
0,2000	28,110	9,332	7,643	7,339	6,939	5,639	3,836	3,046	2,250	9,240	11,725	9,647	2,8006
0,2500	32,135	10,637	8,627	8,307	7,755	6,131	4,144	3,249	2,389	10,044	12,730	10,957	3,5008
0,3200	36,060	11,771	9,574	9,137	8,359	6,405	4,274	3,333	2,434	10,697	13,586	12,129	4,4810
0,4000	38,233	12,622	10,024	9,528	8,627	6,440	4,258	3,315	2,414	10,986	13,988	12,720	5,6012
0,5000	39,078	12,985	10,088	9,598	8,587	6,315	4,165	3,252	2,370	10,982	14,020	12,875	7,0015

E_m, МэВ, а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,6000	38,389	12,877	9,745	9,262	8,276	6,052	4,014	3,132	2,291	10,652	13,669	12,496	8,4018
0,7000	36,552	12,561	9,239	8,781	7,858	5,739	3,840	2,988	2,209	10,210	13,121	11,865	9,8021
0,8000	34,352	12,055	8,714	8,310	7,426	5,431	3,675	2,868	2,130	9,738	12,500	11,201	11,202
0,9000	32,174	11,468	8,216	7,831	6,963	5,136	3,505	2,769	2,057	9,279	11,899	10,537	12,603
1,0000	30,373	10,983	7,838	7,438	6,627	4,908	3,381	2,694	2,000	8,864	11,355	9,985	14,003
1,2500	26,604	9,962	7,093	6,771	6,017	4,512	3,169	2,559	1,932	8,013	10,176	8,977	17,504
1,6000	22,444	8,789	6,346	6,068	5,432	4,146	2,974	2,418	1,872	7,076	8,854	7,885	22,405
2,0000	18,866	7,733	5,733	5,459	4,940	3,837	2,803	2,301	1,809	6,289	7,747	6,949	28,006
2,5000	15,539	6,680	5,102	4,855	4,481	3,544	2,631	2,191	1,743	5,533	6,697	6,043	35,007
3,2000	12,601	5,599	4,439	4,238	3,935	3,186	2,423	2,016	1,617	4,763	5,678	5,166	44,810
4,0000	10,386	4,696	3,840	3,682	3,462	2,832	2,172	1,828	1,479	4,110	4,843	4,428	56,012
5,0000	8,648	3,930	3,288	3,165	2,983	2,472	1,923	1,624	1,333	3,519	4,120	3,775	70,015
6,0000	7,454	3,389	2,881	2,771	2,624	2,191	1,711	1,455	1,198	3,077	3,593	3,291	84,018
7,0000	6,586	2,991	2,570	2,478	2,343	1,969	1,549	1,321	1,092	2,744	3,194	2,935	98,021
8,0000	5,909	2,673	2,323	2,241	2,117	1,786	1,405	1,205	1,001	2,477	2,887	2,650	112,02
9,0000	5,355	2,434	2,119	2,046	1,936	1,637	1,290	1,108	0,925	2,256	2,617	2,414	126,03
10,0000	4,908	2,241	1,955	1,888	1,786	1,510	1,193	1,026	0,859	2,075	2,403	2,223	140,03
11,0000	4,529	2,077	1,816	1,754	1,659	1,403	1,112	0,956	0,801	1,923	2,225	2,062	154,03
12,0000	4,203	1,936	1,697	1,639	1,550	1,311	1,042	0,896	0,751	1,792	2,070	1,924	168,04

Таблица 42.14. **Пробег R, мг/см², ионов азота $^{14}_{7}N^{+}$ в различных веществах [1]**
E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,073	0,083	0,116	0,176	0,209	0,247	0,272	0,303	0,474	0,561	0,614	0,734	0,1750
0,0160	0,088	0,100	0,139	0,210	0,250	0,293	0,322	0,358	0,559	0,661	0,721	0,861	0,2240
0,0200	0,103	0,118	0,163	0,246	0,293	0,341	0,375	0,414	0,647	0,763	0,833	0,992	0,2801
0,0250	0,120	0,138	0,191	0,287	0,342	0,396	0,434	0,479	0,747	0,880	0,960	1,141	0,3501
0,0320	0,141	0,163	0,225	0,338	0,405	0,466	0,509	0,560	0,874	1,028	1,120	1,328	0,4481
0,0400	0,163	0,189	0,261	0,391	0,469	0,537	0,586	0,644	1,004	1,180	1,285	1,520	0,5601
0,0500	0,188	0,219	0,301	0,451	0,542	0,617	0,673	0,737	1,151	1,349	1,469	1,734	0,7001
0,0600	0,211	0,245	0,338	0,505	0,608	0,691	0,752	0,823	1,284	1,503	1,635	1,928	0,8402
0,0700	0,232	0,270	0,372	0,556	0,669	0,758	0,826	0,902	1,407	1,643	1,787	2,105	0,9802
0,0800	0,252	0,294	0,405	0,604	0,727	0,822	0,894	0,976	1,521	1,774	1,928	2,269	1,1202
0,0900	0,272	0,316	0,436	0,649	0,781	0,882	0,960	1,046	1,628	1,896	2,060	2,422	1,2603
0,1000	0,291	0,337	0,466	0,693	0,833	0,940	1,023	1,114	1,730	2,012	2,185	2,567	1,4003
0,1250	0,335	0,387	0,538	0,795	0,956	1,075	1,169	1,271	1,966	2,282	2,475	2,903	1,7504
0,1600	0,394	0,449	0,630	0,926	1,112	1,247	1,357	1,470	2,261	2,619	2,835	3,317	2,2405
0,2000	0,458	0,513	0,730	1,064	1,276	1,429	1,554	1,681	2,568	2,968	3,207	3,743	2,8006
0,2500	0,536	0,589	0,850	1,228	1,469	1,642	1,787	1,929	2,923	3,369	3,635	4,233	3,5008
0,3200	0,644	0,690	1,013	1,447	1,726	1,924	2,095	2,259	3,387	3,893	4,193	4,870	4,4810
0,4000	0,769	0,803	1,197	1,689	2,008	2,233	2,435	2,622	3,890	4,458	4,795	5,555	5,6012
0,5000	0,927	0,945	1,425	1,987	2,353	2,609	2,847	3,064	4,493	5,135	5,515	6,374	7,0015
0,6000	1,089	1,089	1,655	2,282	2,693	2,979	3,254	3,501	5,080	5,794	6,215	7,165	8,4018
0,7000	1,257	1,238	1,889	2,579	3,033	3,348	3,661	3,938	5,662	6,444	6,904	7,941	9,8021
0,8000	1,430	1,393	2,126	2,878	3,374	3,717	4,070	4,376	6,240	7,089	7,587	8,712	11,202
0,9000	1,609	1,555	2,368	3,180	3,718	4,088	4,480	4,817	6,817	7,731	8,267	9,476	12,603
1,0000	1,793	1,722	2,614	3,485	4,064	4,461	4,893	5,261	7,394	8,373	8,946	10,236	14,003
1,2500	2,279	2,171	3,251	4,268	4,947	5,410	5,945	6,393	8,847	9,986	10,653	12,145	17,504
1,6000	3,021	2,871	4,202	5,417	6,235	6,791	7,477	8,047	10,932	12,294	13,093	14,868	22,405
2,0000	3,962	3,771	5,380	6,817	7,798	8,461	9,335	10,056	13,425	15,036	15,994	18,095	28,006
2,5000	5,283	5,034	6,999	8,715	9,904	10,703	11,839	12,756	16,736	18,670	19,830	22,339	35,007
3,2000	7,409	7,055	9,552	11,668	13,157	14,164	15,703	16,927	21,769	24,188	25,644	28,743	44,810
4,0000	10,237	9,721	12,887	15,481	17,333	18,601	20,604	22,271	28,126	31,134	32,948	36,000	56,012
5,0000	14,369	13,587	17,687	20,920	23,254	24,882	27,610	29,816	36,987	40,828	43,092	47,909	70,015
6,0000	19,153	18,044	23,183	27,102	29,961	31,974	35,472	38,317	46,907	51,635	54,376	60,230	84,018
7,0000	24,584	23,083	29,369	34,021	37,454	39,868	44,208	47,759	57,873	63,540	66,795	73,734	98,021
8,0000	30,658	28,700	36,235	41,667	45,721	48,564	53,797	58,131	69,834	76,530	80,323	88,419	112,02
9,0000	37,359	34,891	43,773	50,028	54,748	58,052	64,229	69,414	82,796	90,580	94,944	104,253	126,03
10,0000	44,678	41,656	51,974	59,090	64,529	68,316	75,510	81,582	96,755	105,669	110.624	121,215	140,04
11,0000	52,615	48,985	60,832	68,839	75,048	79,346	87,626	94,607	111,691	121,757	127,303	139,290	154,03
12,0000	61,160	56,874	70,337	79,273	86,290	91,125	100,559	108,473	127,573	138,822	144,987	158,473	168,04

E_m, МэВ/а. е. м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	0,027	0,069	0,100	0,106	0,119	0,186	0,318	0,469	0,733	0,080	0,063	0,077	0,1750
0,0160	0,033	0,084	0,122	0,129	0,144	0,224	0,379	0,555	0,863	0,097	0,076	0,095	0,2240
0,0200	0,039	0,100	0,145	0,154	0,171	0,263	0,442	0,643	0,994	0,116	0,090	0,114	0,2801
0,0250	0,047	0,119	0,172	0,182	0,203	0,308	0,512	0,739	1,133	0,136	0,107	0,136	0,3501
0,0320	0,057	0,145	0,207	0,219	0,244	0,363	0,597	0,854	1,295	0,163	0,128	0,164	0,4481
0,0400	0,067	0,173	0,244	0,258	0,286	0,419	0,681	0,965	1,452	0,190	0,149	0,194	0,5601
0,0500	0,079	0,207	0,288	0,303	0,334	0,479	0,772	1,082	1,615	0,221	0,173	0,228	0,7001
0,0600	0,090	0,239	0,327	0,344	0,378	0,533	0,851	1,184	1,754	0,250	0,196	0,260	0,8402
0,0700	0,100	0,269	0,364	0,382	0,418	0,582	0,922	1,274	1,876	0,276	0,216	0,289	0,9802
0,0800	0,110	0,297	0,398	0,417	0,455	0,626	0,987	1,355	1,986	0,301	0,236	0,316	1,1202
0,0900	0,119	0,324	0,430	0,450	0,489	0,667	1,048	1,431	2,088	0,324	0,254	0,341	1,2603
0,1000	0,127	0,349	0,460	0,481	0,522	0,706	1,104	1,501	2,183	0,346	0,272	0,365	1,4003
0,1250	0,146	0,405	0,528	0,550	0,595	0,792	1,229	1,658	2,395	0,397	0,312	0,419	1,7504
0,1600	0,168	0,471	0,608	0,634	0,683	0,897	1,381	1,850	2,653	0,460	0,361	0,483	2,2405
0,2000	0,189	0,535	0,687	0,716	0,769	1,002	1,535	2,043	2,914	0,523	0,411	0,545	2,8006
0,2500	0,212	0,606	0,773	0,805	0,864	1,121	1,710	2,265	3,215	0,596	0,468	0,613	3,5008
0,3200	0,241	0,693	0,881	0,918	0,986	1,277	1,943	2,562	3,621	0,690	0,543	0,698	4,4810
0,4000	0,271	0,785	0,995	1,038	1,118	1,451	2,205	2,899	4,082	0,794	0,624	0,788	5,6012
0,5000	0,308	0,894	1,134	1,184	1,280	1,671	2,537	3,325	4,667	0,921	0,724	0,897	7,0015
0,6000	0,344	1,002	1,275	1,332	1,446	1,897	2,880	3,764	5,268	1,050	0,825	1,007	8,4018
0,7000	0,381	1,112	1,423	1,488	1,620	2,135	3,236	4,222	5,890	1,185	0,929	1,122	9,8021
0,8000	0,421	1,226	1,579	1,652	1,803	2,386	3,609	4,700	6,536	1,325	1,039	1,244	11,202
0,9000	0,463	1,345	1,744	1,825	1,998	2,651	3,999	5,197	7,205	1,472	1,154	1,373	12,603
1,0000	0,507	1,470	1,919	2,009	2,204	2,930	4,406	5,710	7,895	1,627	1,274	1,509	14,003
1,2500	0,631	1,805	2,388	2,502	2,758	3,674	5,476	7,043	9,675	2,042	1,600	1,879	17,504
1,6000	0,831	2,329	3,119	3,267	3,616	4,807	7,072	9,013	12,251	2,693	2,116	2,462	22,405
2,0000	1,104	3,009	4,048	4,240	4,698	6,212	9,012	11,388	15,295	3,533	2,793	3,219	28,006
2,5000	1,513	3,984	5,344	5,602	6,187	8,112	11,592	14,507	19,239	4,722	3,766	4,301	35,007
3,2000	2,215	5,590	7,408	7,767	8,526	11,034	15,479	19,176	25,085	6,635	5,360	6,059	44,810
4,0000	3,197	7,781	10,128	10,610	11,568	14,770	20,372	25,021	32,341	9,173	7,501	8,406	56,012
5,0000	4,680	11,051	14,080	14,723	15,937	20,076	27,242	33,168	42,337	12,865	10,645	11,842	70,015
6,0000	6,428	14,897	18,640	19,461	20,952	26,106	34,977	42,297	53,439	17,130	14,293	15,824	84,018
7,0000	8,430	19,303	23,795	24,815	26,609	32,858	43,592	52,411	65,698	21,957	18,433	20,337	98,021
8,0000	10,678	24,263	29,534	30,765	32,905	40,334	53,095	63,521	79,107	27,336	23,059	25,366	112,02
9,0000	13,170	29,760	35,852	37,311	39,831	48,531	63,506	75,649	93,672	33,267	28,168	30,908	126,03
10,0000	15,904	35,762	42,739	44,443	47,369	57,446	74,803	88,792	109,399	39,745	33,757	36,959	140,03
11,0000	18,876	42,258	50,175	52,145	55,510	67,074	86,969	102,941	126,301	46,761	39,817	43,505	154,03
12,0000	22,087	49,245	58,157	60,410	64,246	77,406	99,990	118,077	144,373	54,308	46,346	50,542	168,04

Таблица 42.15. **Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см$^{-2}$), для ионов кислорода $^{16}_{8}O^{+}$ [1]**

E_n —энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	3,228	2,671	1,956	1,301	1,056	0,959	0,888	0,822	0,522	0,447	0,411	0,352	0,1999
0,0160	3,652	3,021	2,213	1,472	1,195	1,085	1,005	0,930	0,591	0,506	0,465	0,398	0,2559
0,0200	4,083	3,378	2,475	1,646	1,336	1,213	1,124	1,039	0,661	0,565	0,520	0,445	0,3199
0,0250	4,565	3,777	2,767	1,840	1,494	1,356	1,256	1,162	0,739	0,632	0,582	0,498	0,3999
0,0320	5,159	4,276	3,130	2,082	1,694	1,540	1,421	1,315	0,836	0,717	0,660	0,567	0,5118
0,0400	5,754	4,791	3,500	2,334	1,904	1,736	1,599	1,480	0,941	0,810	0,745	0,640	0,6398
0,0500	6,363	5,334	3,885	2,603	2,133	1,942	1,791	1,659	1,053	0,915	0,843	0,725	0,7997
0,0600	6,890	5,830	4,222	2,846	2,339	2,124	1,963	1,820	1,165	1,013	0,935	0,804	0,9597
0,0700	7,347	6,284	4,521	3,065	2,532	2,297	2,125	1,971	1,266	1,108	1,026	0,882	1,1196
0,0800	7,748	6,714	4,789	3,271	2,706	2,452	2,265	2,107	1,365	1,197	1,106	0,953	1,2796
0,0900	8,103	7,113	5,030	3,461	2,867	2,606	2,399	2,233	1,464	1,280	1,187	1,024	1,4395
0,1000	8,423	7,489	5,248	3,637	3,023	2,739	2,519	2,356	1,553	1,359	1,260	1,086	1,5995
0,1250	9,075	8,373	5,707	4,018	3,356	3,042	2,797	2,620	1,755	1,535	1,435	1,241	1,9994
0,1600	9,710	9,438	6,189	4,431	3,726	3,379	3,101	2,909	1,980	1,739	1,631	1,423	2,5592
0,2000	10,171	10,323	6,571	4,777	4,041	3,660	3,358	3,147	2,181	1,925	1,807	1,577	3,1990
0,2500	10,478	11,022	6,880	5,084	4,321	3,922	3,591	3,364	2,374	2,098	1,968	1,720	3,9988
0,3200	10,635	11,555	7,128	5,367	4,583	4,184	3,814	3,564	2,552	2,267	2,128	1,871	5,1184
0,4000	10,635	11,806	7,274	5,543	4,772	4,364	3,979	3,717	2,706	2,408	2,262	1,986	6,3980

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,5000	10,525	11,828	7,360	5,689	4,931	4,526	4,122	3,842	2,841	2,532	2,381	2,098	7,9975
0,6000	10,274	11,571	7,328	5,738	4,998	4,602	4,177	3,891	2,909	2,601	2,451	2,176	9,5970
0,7000	10,004	11,230	7,255	5,731	5,013	4,621	4,186	3,903	2,945	2,633	2,488	2,205	11,196
0,8000	9,716	10,832	7,155	5,702	5,001	4,629	4,185	3,899	2,962	2,662	2,511	2,232	12,796
0,9000	9,445	10,438	7,038	5,645	4,976	4,617	4,167	3,878	2,977	2,675	2,527	2,252	14,395
0,1000	9,172	10,043	6,912	5,592	4,935	4,583	4,140	3,850	2,972	2,675	2,530	2,260	15,995
1,2500	8,532	9,137	6,578	5,394	4,802	4,473	4,033	3,743	2,941	2,651	2,506	2,243	19,994
1,6000	7,743	8,116	6,116	5,107	4,562	4,263	3,841	3,547	2,844	2,575	2,434	2,183	25,592
2,0000	6,978	7,282	5,632	4,770	4,286	4,021	3,604	3,340	2,703	2,467	2,332	2,101	31,990
2,5000	6,196	6,492	5,108	4,338	3,969	3,729	3,335	3,095	2,544	2,314	2,196	1,992	39,987
3,2000	5,360	5,662	4,508	3,922	3,570	3,358	3,011	2,786	2,326	2,128	2,020	1,835	51,184
4,0000	4,646	4,947	3,971	3,490	3,196	3,010	2,712	2,501	2,116	1,938	1,846	1,680	63,980
5,0000	3,988	4,275	3,456	3,062	2,820	2,661	2,398	2,219	1,901	1,735	1,662	1,517	79,975
6,0000	3,502	3,765	3,061	2,731	2,519	2,388	2,155	1,993	1,708	1,577	1,509	1,387	95,970
7,0000	3,118	3,368	2,749	2,463	2,276	2,164	1,957	1,812	1,567	1,441	1,383	1,273	111,96
8,0000	2,814	3,046	2,497	2,247	2,080	1,977	1,798	1,660	1,443	1,331	1,278	1,178	127,96
9,0000	2,569	2,779	2,288	2,066	1,915	1,823	1,659	1,535	1,338	1,235	1,187	1,098	143,95
10,0000	2,361	2,556	2,112	1,916	1,774	1,692	1,540	1,430	1,246	1,155	1,113	1,029	159,95
11,0000	2,186	2,368	1,962	1,786	1,656	1,580	1,438	1,340	1,169	1,087	1,050	0,967	175,94
12,0000	2,036	2,205	1,833	1,672	1,552	1,483	1,351	1,261	1,102	1,026	0,990	0,913	191,94

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	7,337	3,130	2,074	1,949	1,731	1,143	0,700	0,497	0,328	2,624	3,338	2,547	0,1999
0,0160	8,146	3,435	2,309	2,171	1,930	1,304	0,808	0,576	0,382	2,951	3,754	2,835	0,2559
0,0200	8,860	3,638	2,517	2,371	2,121	1,472	0,918	0,668	0,447	3,272	4,160	3,091	0,3199
0,0250	9,629	3,821	2,745	2,587	2,341	1,679	1,074	0,783	0,567	3,625	4,612	3,370	0,3999
0,0320	10,674	4,051	3,002	2,858	2,611	1,956	1,271	0,958	0,667	4,069	5,190	3,725	0,5118
0,0400	11,724	4,263	3,265	3,143	2,894	2,261	1,498	1,148	0,815	4,532	5,782	4,095	0,6398
0,0500	12,859	4,522	3,570	3,473	3,232	2,607	1,756	1,367	0,991	5,027	6,410	4,514	0,7997
0,0600	14,101	4,826	3,914	3,783	3,576	2,943	2,001	1,575	1,157	5,493	7,012	4,931	0,9597
0,0700	15,326	5,190	4,250	4,128	3,915	3,264	2,224	1,768	1,307	5,941	7,577	5,371	1,1196
0,0800	16,617	5,579	4,602	4,473	4,257	3,577	2,452	1,954	1,451	6,379	8,127	5,823	1,2796
0,0900	17,857	5,991	4,955	4,829	4,597	3,878	2,666	2,133	1,579	6,801	8,647	6,278	1,4395
0,1000	19,208	6,445	5,342	5,175	4,923	4,172	2,881	2,293	1,700	7,205	9,163	6,733	1,5995
0,1250	22,658	7,562	6,250	6,021	5,753	4,857	3,345	2,665	1,980	8,184	10,416	7,871	1,9994
0,1600	27,416	9,141	7,501	7,228	6,857	5,712	3,917	3,119	2,315	9,450	12,006	9,469	2,5592
0,2000	32,262	10,710	8,772	8,424	7,964	6,472	4,402	3,496	2,582	10,605	13,457	11,072	3,1990
0,2500	37,290	12,343	10,010	9,639	8,999	7,114	4,809	3,770	2,773	11,655	14,771	12,714	3,9988
0,3200	42,341	13,821	11,241	10,728	9,815	7,520	5,018	3,913	2,858	12,560	15,953	14,242	5,1184
0,4000	45,391	14,985	11,900	11,311	10,242	7,645	5,056	3,935	2,866	13,043	16,607	15,101	6,3980
0,5000	46,957	15,603	12,122	11,533	10,319	7,588	5,005	3,908	2,848	13,196	16,847	15,471	7,9975
0,6000	46,534	15,609	11,813	11,227	10,032	7,335	4,866	3,796	2,777	12,912	16,569	15,147	9,5970
0,7000	44,543	15,307	11,259	10,700	9,576	6,993	4,679	3,642	2,691	12,442	15,989	14,458	11,196
0,8000	41,998	14,739	10,653	10,160	9,079	6,639	4,493	3,506	2,604	11,905	15,282	13,694	12,796
0,9000	39,414	14,048	10,065	9,593	8,530	6,292	4,293	3,392	2,520	11,367	14,576	12,908	14,395
1,0000	37,256	13,471	9,615	9,124	8,129	6,020	4,147	3,304	2,454	10,873	13,928	12,248	15,995
1,2500	32,694	12,242	8,716	8,322	7,394	5,546	3,894	3,144	2,375	9,848	12,505	11,032	19,994
1,6000	27,644	10,825	7,816	7,474	6,691	5,107	3,663	2,978	2,306	8,715	10,905	9,712	25,592
2,0000	23,317	9,558	7,085	6,747	6,105	4,742	3,464	2,844	2,236	7,772	9,574	8,589	31,990
2,5000	19,307	8,300	6,339	6,032	5,567	4,403	3,269	2,722	2,166	6,875	8,320	7,508	39,987
3,2000	15,777	7,010	5,558	5,306	4,927	3,989	3,034	2,524	2,024	5,964	7,109	6,469	51,184
4,0000	13,103	5,924	4,844	4,646	4,368	3,574	2,740	2,307	1,866	5,186	6,111	5,587	63,980
5,0000	10,990	4,994	4,178	4,023	3,791	3,142	2,443	2,063	1,693	4,472	5,236	4,797	79,975
6,0000	9,520	4,329	3,680	3,539	3,352	2,798	2,186	1,858	1,531	3,931	4,589	4,203	95,970
7,0000	8,440	3,832	3,294	3,175	3,002	2,524	1,985	1,694	1,399	3,516	4,094	3,761	111,96
8,0000	7,590	3,433	2,983	2,879	2,719	2,294	1,805	1,548	1,286	3,181	3,695	3,403	127,96
9,0000	6,886	3,129	2,725	2,631	2,489	2,105	1,659	1,425	1,190	2,901	3,365	3,104	143,95
10,0000	6,315	2,883	2,515	2,429	2,298	1,943	1,535	1,320	1,105	2,670	3,092	2,860	159,95
11,0000	5,828	2,673	2,337	2,257	2,135	1,805	1,430	1,230	1,030	2,474	2,863	2,653	175,94
12,0000	5,407	2,491	2,183	2,108	1,994	1,686	1,340	1,153	0,966	2,306	2,663	2,474	191,94

Таблица 42.16. **Пробег R, мг/см², ионов кислорода $^{16}_{8}O^{+}$ в различных веществах [1]**
E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,075	0,084	0,117	0,176	0,208	0,247	0,273	0,304	0,474	0,562	0,614	0,736	0,1999
0,0160	0,090	0,101	0,141	0,212	0,251	0,295	0,324	0,360	0,561	0,663	0,725	0,866	0,2559
0,0200	0,106	0,120	0,166	0,249	0,295	0,345	0,378	0,419	0,652	0,770	0,840	1,002	0,3199
0,0250	0,123	0,141	0,194	0,291	0,346	0,402	0,440	0,486	0,756	0,891	0,971	1,156	0,3999
0,0320	0,146	0,167	0,230	0,345	0,411	0,474	0,518	0,570	0,887	1,044	1,138	1,250	0,5118
0,0400	0,168	0,195	0,267	0,400	0,478	0,549	0,598	0,657	1,023	1,202	1,309	1,550	0,6398
0,0500	0,194	0,225	0,309	0,462	0,554	0,632	0,689	0,755	1,176	1,378	1,500	1,773	0,7997
0,0600	0,218	0,253	0,348	0,519	0,623	0,709	0,771	0,844	1,314	1,538	1,673	1,974	0,9597
0,0700	0,240	0,279	0,384	0,572	0,687	0,779	0,848	0,926	1,442	1,684	1,831	2,158	1,1196
0,0800	0,262	0,304	0,418	0,622	0,746	0,845	0,919	1,003	1,560	1,819	1,977	2,328	1,2796
0,0900	0,282	0,327	0,450	0,668	0,802	0,907	0,986	1,076	1,671	1,945	2,113	2,486	1,4395
0,1000	0,301	0,349	0,481	0,714	0,856	0,966	1,050	1,144	1,775	2,064	2,241	2,635	1,5995
0,1250	0,347	0,399	0,554	0,818	0,981	1,104	1,201	1,305	2,017	2,340	2,538	2,978	1,9994
0,1600	0,406	0,462	0,648	0,950	1,139	1,279	1,390	1,507	2,316	2,682	2,903	3,399	2,5592
0,2000	0,470	0,527	0,748	1,089	1,304	1,460	1,588	1,718	2,624	3,031	3,275	3,825	3,1990
0,2500	0,548	0,602	0,867	1,251	1,495	1,671	1,818	1,963	2,974	3,428	3,699	4,309	3,9988
0,3200	0,654	0,701	1,026	1,465	1,746	1,947	2,120	2,286	3,428	3,941	4,245	4,932	5,1184
0,4000	0,774	0,810	1,204	1,699	2,019	2,246	2,448	2,637	3,915	4,488	4,827	5,595	6,3980
0,5000	0,925	0,945	1,422	1,984	2,349	2,605	2,843	3,060	4,491	5,135	5,516	6,379	7,9975
0,6000	1,079	1,082	1,640	2,264	2,671	2,956	3,228	3,474	5,047	5,758	6,178	7,127	9,5970
0,7000	1,236	1,222	1,859	2,542	2,990	3,302	3,610	3,884	5,593	6,369	6,825	7,856	11,196
0,8000	1,398	1,367	2,081	2,822	3,309	3,648	3,992	4,294	6,135	6,973	7,465	8,577	12,796
0,9000	1,565	1,518	2,306	3,104	3,630	3,994	4,375	4,705	6,673	7,572	8,099	9,290	14,395
1,0000	1,737	1,674	2,536	3,389	3,953	4,432	4,760	5,119	7,211	8,170	8,732	9,999	15,995
1,2500	2,189	2,091	3,128	4,117	4,774	5,225	5,739	6,172	8,563	9,671	10,319	11,774	19,994
1,6000	2,878	2,741	4,011	5,183	5,970	6,507	7,161	7,708	10,498	11,813	12,585	14,303	25,592
2,0000	3,749	3,574	5,102	6,480	7,417	8,052	8,881	9,568	12,807	14,352	15,271	17,291	31,990
2,5000	4,967	4,739	6,594	8,230	9,358	10,119	11,190	12,057	15,858	17,702	18,808	21,202	39,987
3,2000	6,914	6,589	8,932	10,933	12,337	13,288	14,728	15,876	20,468	22,755	24,131	27,067	51,184
4,0000	9,483	9,012	11,963	14,398	16,132	17,320	19,214	20,732	26,244	29,067	30,768	34,367	63,980
5,0000	13,209	12,499	16,291	19,303	21,471	22,985	25,499	27,536	34,235	37,809	39,916	44,407	79,975
6,0000	17,497	16,493	21,218	24,844	27,483	29,342	32,547	35,156	43,128	47,496	50,031	55,451	95,970
7,0000	22,346	20,992	26,740	31,021	34,172	36,389	40,345	43,586	52,916	58,124	61,117	67,505	111,96
8,0000	27,753	25,992	32,852	37,828	41,532	44,131	48,882	52,819	63,565	69,689	73,160	80,579	127,96
9,0000	33,709	31,495	39,552	45,259	49,555	52,563	58,155	62,848	75,085	82,175	86,156	94,653	143,95
10,0000	40,209	37,502	46,835	53,306	58,240	61,678	68,172	73,653	87,481	95,574	100,080	109,714	159,95
11,0000	47,254	44,008	54,698	61,961	67,578	71,469	78,928	85,215	100,740	109,856	114,886	125,760	175,94
12,0000	54,840	51,012	63,137	71,224	77,559	81,926	90,409	97,525	114,840	125,007	130,587	142,791	191,94

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	0,027	0,070	0,101	0,107	0,119	0,185	0,316	0,466	0,729	0,081	0,063	0,078	0,1999
0,0160	0,033	0,085	0,123	0,131	0,145	0,225	0,379	0,555	0,863	0,099	0,077	0,096	0,2559
0,0200	0,040	0,102	0,147	0,156	0,174	0,266	0,444	0,645	0,998	0,118	0,092	0,116	0,3199
0,0250	0,048	0,122	0,175	0,186	0,206	0,312	0,517	0,745	1,141	0,139	0,109	0,138	0,3999
0,0320	0,058	0,149	0,212	0,224	0,249	0,370	0,605	0,865	1,309	0,167	0,131	0,168	0,5118
0,0400	0,069	0,179	0,251	0,265	0,293	0,427	0,693	0,980	1,473	0,195	0,153	0,199	0,6398
0,0500	0,082	0,214	0,296	0,311	0,343	0,491	0,787	1,102	1,643	0,228	0,179	0,235	0,7997
0,0600	0,093	0,248	0,337	0,354	0,388	0,547	0,870	1,208	1,787	0,258	0,202	0,268	0,9597
0,0700	0,104	0,279	0,376	0,394	0,430	0,597	0,944	1,302	1,914	0,285	0,224	0,298	1,1196
0,0800	0,113	0,308	0,411	0,430	0,469	0,643	1,011	1,386	2,028	0,311	0,244	0,326	1,2796
0,0900	0,123	0,335	0,444	0,464	0,504	0,685	1,073	1,464	2,134	0,335	0,263	0,352	1,4395
0,1000	0,131	0,361	0,475	0,496	0,538	0,725	1,130	1,537	2,231	0,357	0,281	0,377	1,5995
0,1250	0,150	0,418	0,544	0,567	0,613	0,814	1,259	1,698	2,449	0,409	0,322	0,432	1,9994
0,1600	0,173	0,485	0,626	0,652	0,702	0,920	1,413	1,892	2,710	0,473	0,372	0,496	2,5592
0,2000	0,194	0,550	0,705	0,734	0,788	1,025	1,567	2,085	2,971	0,537	0,422	0,559	3,1990
0,2500	0,217	0,619	0,790	0,822	0,882	1,143	1,740	2,305	3,269	0,609	0,479	0,626	3,9988
0,3200	0,245	0,705	0,895	0,932	1,001	1,295	1,968	2,596	3,666	0,701	0,551	0,709	5,1184
0,4000	0,274	0,794	1,006	1,048	1,129	1,464	2,222	2,922	4,113	0,801	0,630	0,796	6,3980
0,5000	0,309	0,898	1,139	1,188	1,284	1,674	2,539	3,329	4,672	0,923	0,725	0,901	7,9975
0,6000	0,343	1,001	1,272	1,329	1,441	1,888	2,863	3,744	5,240	1,045	0,821	1,005	9,5970

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,7000	0,378	1,104	1,411	1,475	1,604	2,111	3,198	4,174	5,825	1,171	0,919	1,113	11,196
0,8000	0,415	1,211	1,557	1,628	1,776	2,346	3,547	4,622	6,429	1,303	1,022	1,227	12,796
0,9000	0,455	1,322	1,711	1,790	1,958	2,593	3,911	5,085	7,054	1,440	1,129	1,347	14,395
1,0000	0,496	1,438	1,874	1,961	2,150	2,853	4,290	5,563	7,697	1,584	1,241	1,474	15,995
1,2500	0,611	1,749	2,311	2,420	2,665	3,545	5,285	6,803	9,353	1,970	1,544	1,818	19,994
1,6000	0,797	2,236	2,989	3,130	3,462	4,597	6,767	8,633	11,745	2,575	2,024	2,359	25,592
2,0000	1,049	2,865	3,849	4,031	4,463	5,898	8,564	10,831	14,563	3,353	2,650	3,060	31,990
2,5000	1,427	3,764	5,044	5,286	5,836	7,650	10,942	13,707	18,198	4,448	3,547	4,058	39,987
3,2000	2,070	5,235	6,934	7,269	7,978	10,325	14,502	17,983	23,551	6,200	5,006	5,667	51,184
4,0000	2,962	7,226	9,405	9,852	10,741	13,720	18,948	23,293	30,145	8,506	6,952	7,801	63,980
5,0000	4,299	10,175	12,970	13,561	14,682	18,505	25,143	30,640	30,159	11,836	9,787	10,898	79,975
6,0000	5,866	13,622	17,057	17,809	19,177	23,910	32,077	38,823	49,111	15,658	13,057	14,468	95,970
7,0000	7,653	17,556	21,658	22,587	24,227	29,938	39,767	47,852	60,055	19,967	16,753	18,497	111,96
8,0000	9,654	21,971	26,767	27,884	29,833	36,593	48,227	57,743	71,992	24,756	20,871	22,974	127,96
9,0000	11,869	26,856	32,383	33,703	35,988	43,879	57,480	68,522	84,938	30,028	25,412	27,900	143,95
10,0000	14,297	32,186	38,498	40,036	42,682	51,795	67,512	80,194	98,903	35,780	30,375	33,273	159,95
11,0000	16,935	37,953	45,100	46,873	49,908	60,342	78,312	92,754	113,908	42,008	35,755	39,084	175,94
12,0000	19,786	44,156	52,186	54,211	57,665	69,515	89,873	106,192	129,952	48,709	41,551	45,331	191,94

Таблица 42.17. **Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см$^{-2}$), для ионов фтора $^{19}_{9}F^{+}$ [1]**
E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	3,408	2,819	2,066	1,374	1,115	1,012	0,938	0,868	0,551	0,472	0,434	0,372	0,2375
0,0160	3,856	3,190	2,337	1,554	1,262	1,145	1,061	0,981	0,624	0,534	0,491	0,421	0,3040
0,0200	4,311	3,566	2,613	1,737	1,411	1,280	1,186	1,097	0,698	0,597	0,549	0,470	0,3800
0,0250	4,820	3,987	2,921	1,943	1,577	1,431	1,326	1,227	0,780	0,667	0,615	0,526	0,4749
0,0320	5,446	4,514	3,305	2,198	1,788	1,626	1,500	1,388	0,882	0,757	0,697	0,598	0,6079
0,0400	6,074	5,058	3,695	2,464	2,010	1,833	1,689	1,563	0,994	0,855	0,787	0,676	0,7599
0,0500	6,767	5,672	4,131	2,768	2,268	2,066	1,904	1,764	1,120	0,973	0,896	0,770	0,9499
0,0600	7,350	6,220	4,504	3,036	2,495	2,265	2,094	1,941	1,243	1,081	0,998	0,858	1,1399
0,0700	7,862	6,725	4,838	3,280	2,710	2,458	2,274	2,110	1,355	1,185	1,098	0,943	1,3299
0,0800	8,319	7,208	5,141	3,512	2,905	2,632	2,432	2,262	1,465	1,285	1,188	1,023	1,5198
0,0900	8,727	7,660	5,417	3,727	3,088	2,806	2,584	2,405	1,576	1,379	1,279	1,102	1,7098
0,1000	9,100	8,091	5,670	3,929	3,266	2,960	2,722	2,546	1,678	1,469	1,361	1,174	1,8998
0,1250	9,882	9,117	6,125	4,375	3,654	3,313	3,045	2,853	1,911	1,672	1,563	1,352	2,3747
0,1600	10,685	10,386	6,810	4,876	4,100	3,718	3,412	3,201	2,179	1,914	1,794	1,566	3,0397
0,2000	11,313	11,481	7,308	5,313	4,495	4,071	3,734	3,501	2,426	2,141	2,010	1,754	3,7996
0,2500	11,781	12,392	7,735	5,717	4,858	4,409	4,038	3,783	2,669	2,359	2,212	1,934	4,7495
0,3200	12,090	13,135	8,103	6,102	5,210	4,757	4,335	4,052	2,901	2,577	2,419	2,127	6,0794
0,4000	12,195	13,538	8,341	6,356	5,472	5,005	4,563	4,262	3,103	2,761	2,594	2,277	7,5992
0,5000	12,162	13,668	8,505	6,574	5,698	5,231	4,763	4,440	3,283	2,926	2,751	2,424	9,4990
0,6000	11,924	13,430	8,505	6,660	5,801	5,341	4,848	4,516	3,377	3,019	2,845	2,526	11,399
0,7000	11,647	13,074	8,446	6,672	5,836	5,380	4,873	4,544	3,429	3,066	2,897	2,568	13,299
0,8000	11,339	12,642	8,350	6,655	5,837	5,402	4,885	4,551	3,457	3,106	2,931	2,605	15,198
0,9000	11,047	12,208	8,232	6,602	5,820	5,400	4,873	4,536	3,482	3,128	2,955	2,634	17,098
1,0000	10,749	11,769	8,100	6,553	5,783	5,370	4,852	4,512	3,483	3,135	2,965	2,649	18,998
1,2500	10,046	10,758	7,745	6,351	5,654	5,267	4,748	4,407	3,462	3,121	2,951	2,641	23,747
1,6000	9,176	9,618	7,248	6,052	5,407	5,052	4,552	4,204	3,370	3,051	2,885	2,587	30,397
2,0000	8,330	8,693	6,723	5,694	5,116	4,800	4,303	3,987	3,227	2,945	2,783	2,508	37,996
2,5000	7,459	7,816	6,149	5,282	4,778	4,489	4,015	3,726	3,062	2,786	2,644	2,398	47,495
3,2000	6,520	6,888	5,484	4,771	4,343	4,085	3,663	3,389	2,830	2,588	2,457	2,232	60,794
4,0000	5,706	6,077	4,877	4,287	3,926	3,697	3,331	3,073	2,600	2,380	2,268	2,063	75,992
5,0000	4,945	5,300	4,285	3,796	3,496	3,299	2,974	2,751	2,357	2,151	2,061	1,881	94,990
6,0000	4,372	4,701	3,822	3,409	3,145	2,981	2,691	2,488	2,133	1,968	1,884	1,731	113,99
7,0000	3,912	4,226	3,450	3,091	2,857	2,715	2,456	2,274	1,967	1,808	1,735	1,597	132,99
8,0000	3,544	3,837	3,145	2,830	2,620	2,491	2,264	2,091	1,818	1,676	1,610	1,484	151,98
9,0000	3,245	3,511	2,890	2,609	2,419	2,303	2,095	1,939	1,690	1,560	1,500	1,387	170,98
10,0000	2,988	3,234	2,673	2,424	2,245	2,141	1,949	1,810	1,577	1,462	1,409	1,302	189,98
11,0000	2,770	3,002	2,487	2,263	2,099	2,002	1,823	1,698	1,482	1,378	1,330	1,226	208,98
12,0000	2,583	2,797	2,325	2,120	1,969	1,881	1,713	1,600	1,397	1,302	1,255	1,158	227,98

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	7,746	3,305	2,189	2,057	1,828	1,206	0,739	0,525	0,346	2,770	3,524	2,689	0,2375
0,0160	8,600	3,627	2,437	2,292	2,038	1,376	0,853	0,608	0,403	3,115	3,963	2,994	0,3040
0,0200	9,353	3,841	2,657	2,503	2,239	1,555	0,969	0,705	0,472	3,454	4,392	3,263	0,3800
0,0250	10,165	4,034	2,898	2,731	2,471	1,773	1,133	0,827	0,599	3,827	4,869	3,558	0,4749
0,0320	11,269	4,276	3,169	3,017	2,756	2,066	1,342	1,011	0,704	4,296	5,479	3,933	0,6079
0,0400	12,378	4,500	3,447	3,318	3,056	2,387	1,581	1,212	0,861	4,785	6,104	4,323	0,7599
0,0500	13,674	4,808	3,796	3,693	3,437	2,772	1,867	1,454	1,053	5,346	6,816	4,800	0,9499
0,0600	15,043	5,148	4,175	4,035	3,815	3,139	2,135	1,680	1,234	5,860	7,481	5,261	1,1399
0,0700	16,402	5,554	4,548	4,417	4,190	3,493	2,380	1,892	1,398	6,358	8,109	5,748	1,3299
0,0800	17,840	5,990	4,941	4,802	4,571	3,841	2,632	2,098	1,558	6,848	8,725	6,252	1,5198
0,0900	19,232	6,452	5,336	5,201	4,951	4,177	2,871	2,297	1,701	7,324	9,312	6,761	1,7098
0,1000	20,752	6,963	5,772	5,591	5,318	4,508	3,113	2,478	1,837	7,785	9,900	7,275	1,8998
0,1250	24,673	8,235	6,805	6,557	6,265	5,289	3,642	2,902	2,157	8,912	11,342	8,570	2,3747
0,1600	30,169	10,059	8,254	7,954	7,546	6,286	4,311	3,432	2,547	10,399	13,212	10,470	3,0397
0,2000	35,883	11,912	9,756	9,369	8,858	7,199	4,896	3,888	2,872	11,795	14,967	12,314	3,7996
0,2500	41,926	13,877	11,255	10,837	10,118	7,998	5,407	4,239	3,117	13,104	16,608	14,295	4,7495
0,3200	48,133	15,712	12,779	12,195	11,158	8,549	5,705	4,449	3,249	14,278	18,135	16,190	6,0794
0,4000	52,050	17,183	13,646	12,971	11,745	8,767	5,797	4,513	3,286	14,956	19,043	17,317	7,5992
0,5000	54,262	18,031	14,008	13,327	11,924	8,769	5,783	4,516	3,291	15,249	19,468	17,877	9,4990
0,6000	54,009	18,116	13,711	13,030	11,644	8,514	5,648	4,406	3,224	14,986	19,230	17,580	11,399
0,7000	51,858	17,821	13,108	12,458	11,149	8,142	5,448	4,240	3,133	14,485	18,665	16,833	13,299
0,8000	49,015	17,201	12,433	11,857	10,596	7,749	5,244	4,092	3,039	13,894	17,836	15,982	15,198
0,9000	46,098	16,431	11,771	11,220	9,977	7,359	5,021	3,968	2,947	13,294	17,048	15,097	17,098
1,0000	43,659	15,787	11,267	10,692	9,526	7,055	4,860	3,872	2,876	12,741	16,322	14,353	18,998
1,2500	38,494	14,414	10,262	9,798	8,706	6,529	4,585	3,702	2,796	11,595	14,724	12,989	23,747
1,6000	32,760	12,828	9,263	8,857	7,929	6,052	4,341	3,532	2,732	10,328	12,923	11,509	30,397
2,0000	27,833	11,409	8,458	8,054	7,288	5,661	4,135	3,395	2,669	9,278	11,429	10,253	37,996
2,5000	23,244	9,992	7,631	7,262	6,703	5,301	3,935	3,278	2,607	8,277	10,017	9,039	47,495
3,2000	19,193	8,527	6,761	6,454	5,994	4,853	3,691	3,071	2,462	7,255	8,648	7,869	60,794
4,0000	16,095	7,277	5,950	5,706	5,365	4,389	3,365	2,834	2,292	6,70	7,506	6,862	75,992
5,0000	13,626	6,192	5,180	4,988	4,701	3,895	3,029	2,558	2,100	5,545	6,492	5,947	94,990
6,0000	11,886	5,404	4,594	4,418	4,185	3,493	2,729	2,320	1,911	4,907	5,729	5,247	113,99
7,0000	10,592	4,809	4,133	3,985	3,767	3,167	2,491	2,125	1,756	4,413	5,137	4,720	132,99
8,0000	9,560	4,324	3,758	3,626	3,425	2,890	2,274	1,950	1,620	4,006	4,654	4,286	151,98
9,0000	8,698	3,953	3,442	3,323	3,144	2,658	2,095	1,800	1,503	3,664	4,251	3,921	170,98
10,0000	7,992	3,649	3,184	3,074	2,908	2,459	1,943	1,671	1,398	3,379	3,913	3,619	189,88
11,0000	7,386	3,387	2,962	2,860	2,706	2,288	1,813	1,559	1,306	3,136	3,628	3,362	208,98
12,0000	6,858	3,160	2,769	2,674	2,529	2,139	1,700	1,462	1,225	2,925	3,378	3,139	227,98

Таблица 42.18. **Пробег R, мг/см², ионов фтора $^{19}_{9}F^{+}$ в различных веществах [1]**
E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,081	0,090	0,125	0,187	0,219	0,260	0,287	0,321	0,497	0,589	0,644	0,773	0,2375
0,0160	0,098	0,109	0,151	0,225	0,265	0,313	0,344	0,382	0,592	0,700	0,765	0,916	0,3040
0,0200	0,115	0,130	0,179	0,266	0,314	0,368	0,403	0,447	0,692	0,817	0,891	1,064	0,3800
0,0250	0,135	0,153	0,210	0,313	0,371	0,431	0,471	0,521	0,806	0,950	1,036	1,234	0,4749
0,0320	0,160	0,183	0,251	0,373	0,443	0,512	0,558	0,614	0,952	1,119	1,219	1,449	0,6079
0,0400	0,186	0,214	0,292	0,434	0,517	0,594	0,648	0,711	1,102	1,294	1,409	1,670	0,7599
0,0500	0,215	0,248	0,339	0,504	0,601	0,687	0,748	0,820	1,272	1,490	1,621	1,917	0,9499
0,0600	0,241	0,279	0,382	0,567	0,678	0,772	0,840	0,919	1,425	1,666	1,812	2,140	1,1399
0,0700	0,266	0,308	0,421	0,626	0,748	0,850	0,924	1,010	1,566	1,828	1,986	2,343	1,3299
0,0800	0,289	0,335	0,459	0,680	0,814	0,923	1,003	1,094	1,697	1,977	2,147	2,529	1,5198
0,0900	0,311	0,360	0,494	0,732	0,876	0,991	1,077	1,174	1,818	2,115	2,297	2,703	1,7098
0,1000	0,333	0,384	0,528	0,781	0,934	1,056	1,147	1,249	1,932	2,246	2,437	2,866	1,8998
0,1250	0,383	0,440	0,608	0,895	1,069	1,207	1,311	1,425	2,192	2,542	2,756	3,235	2,3747
0,1600	0,447	0,508	0,710	1,039	1,238	1,396	1,517	1,645	2,513	2,908	3,146	3,685	3,0397
0,2000	0,516	0,577	0,818	1,188	1,413	1,591	1,730	1,871	2,839	3,279	3,541	4,137	3,7996
0,2500	0,598	0,657	0,944	1,360	1,615	1,815	1,974	2,132	3,209	3,697	3,987	4,648	4,7495
0,3200	0,710	0,761	1,111	1,584	1,879	2,105	2,291	2,471	3,686	4,235	4,561	5,302	6,0794

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,4000	0,834	0,875	1,296	1,828	2,163	2,416	2,632	2,836	4,191	4,804	5,167	5,992	7,5992
0,5000	0,990	1,014	1,521	2,122	2,503	2,787	3,039	3,272	4,786	5,472	5,877	6,799	9,4990
0,6000	1,148	1,154	1,745	2,409	2,833	3,146	3,434	3,696	5,356	6,111	6,556	7,567	11,399
0,7000	1,309	1,298	1,969	2,693	3,159	3,500	3,825	4,115	5,914	6,735	7,217	8,312	13,299
0,8000	1,474	1,445	2,195	2,978	3,485	3,853	4,214	4,533	6,466	7,350	7,869	9,046	15,198
0,9000	1,644	1,598	2,424	3,265	3,811	4,204	4,604	4,951	7,013	7,960	8,514	9,772	17,098
1,0000	1,818	1,757	2,656	3,554	4,138	4,557	4,994	5,371	7,559	8,566	9,156	10,491	18,998
1,2500	2,275	2,179	3,256	4,290	4,968	5,450	5,984	6,436	8,926	10,084	10,761	12,285	23,747
1,6000	2,968	2,832	4,144	5,362	6,171	6,739	7,414	7,980	10,872	12,238	13,040	14,828	30,397
2,0000	3,838	3,664	5,233	6,657	7,616	8,282	9,131	9,837	13,177	14,773	15,722	17,812	37,996
2,5000	5,044	4,818	6,711	8,390	9,539	10,330	11,418	12,303	16,200	18,092	19,225	21,687	47,495
3,2000	6,954	6,633	9,005	11,043	12,462	13,439	14,890	16,051	20,723	23,050	24,449	27,441	60,794
4,0000	9,451	8,987	11,949	14,409	16,148	17,356	19,248	20,768	26,334	29,181	30,896	34,533	75,992
5,0000	13,035	12,341	16,113	19,128	21,286	22,806	25,295	27,314	34,023	37,593	39,698	44,193	94,990
6,0000	17,128	16,154	20,816	24,417	27,023	28,873	32,022	34,587	42,510	46,839	49,352	54,734	113,99
7,0000	21,728	20,422	26,055	30,277	33,369	35,559	39,421	42,585	51,798	56,922	59,870	66,171	132,99
8,0000	26,836	25,145	31,829	36,707	40,321	42,872	47,484	51,306	61,856	67,846	71,246	78,520	151,98
9,0000	32,443	30,326	38,136	43,704	47,876	50,812	56,215	60,749	72,703	79,602	83,482	91,771	170,98
10,0000	38,548	35,968	44,977	51,263	56,034	59,373	65,624	70,898	84,347	92,188	96,561	105,919	189,98
11,0000	45,156	42,070	52,351	59,379	64,791	68,556	75,711	81,741	96,780	105,582	110,446	120,966	208,98
12,0000	52.262	48,631	60.257	68,056	74.141	78,352	86,467	93,273	109,989	119,774	125,154	136,920	227,98

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	0,029	0,076	0,108	0,114	0,126	0,196	0,331	0,487	0,760	0,087	0,068	0,084	0,2375
0,0160	0,036	0,093	0,133	0,140	0,156	0,239	0,399	0,583	0,905	0,107	0,084	0,104	0,3040
0,0200	0,044	0,111	0,159	0,168	0,187	0,284	0,471	0,682	1,052	0,128	0,100	0,125	0,3800
0,0250	0,052	0,134	0,190	0,201	0,223	0,335	0,551	0,792	1,209	0,152	0,119	0,150	0,4749
0,0320	0,064	0,164	0,231	0,244	0,270	0,399	0,649	0,925	1,395	0,182	0,144	0,183	0,6079
0,0400	0,076	0,197	0,274	0,289	0,319	0,463	0,747	1,053	1,576	0,214	0,169	0,218	0,7599
0,0500	0,090	0,236	0,325	0,341	0,375	0,534	0,852	1,189	1,765	0,251	0,197	0,258	0,9499
0,0600	0,103	0,273	0,371	0,389	0,426	0,596	0,943	1,306	1,925	0,284	0,223	0,295	1,1399
0,0700	0,114	0,308	0,413	0,432	0,472	0,652	1,025	1,409	2,066	0,314	0,247	0,328	1,3299
0,0800	0,125	0,340	0,452	0,473	0,514	0,703	1,099	1,502	2,191	0,342	0,269	0,359	1,5198
0,0900	0,135	0,370	0,489	0,510	0,553	0,749	1,167	1,587	2,305	0,369	0,290	0,388	1,7098
0,1000	0,145	0,398	0,522	0,545	0,590	0,793	1,230	1,667	2,413	0,394	0,310	0,415	1,8998
0,1250	0,165	0,461	0,598	0,623	0,672	0,890	1,371	1,844	2,651	0,451	0,354	0,475	2,3747
0,1600	0,190	0,534	0,687	0,715	0,768	1,005	1,539	2,054	2,934	0,520	0,409	0,545	3,0397
0,2000	0,213	0,603	0,771	0,803	0,861	1,118	1,704	2,261	3,215	0,588	0,462	0,612	3,7996
0,2500	0,237	0,677	0,862	0,897	0,961	1,243	1,888	2,495	3,531	0,664	0,523	0,683	4,7495
0,3200	0,267	0,767	0,972	1,012	1,086	1,404	2,127	2,801	3,948	0,761	0,599	0,771	6,0794
0,4000	0,297	0,859	1,087	1,133	1,219	1,579	2,391	3,139	4,413	0,865	0,681	0,861	7,5992
0,5000	0,333	0,967	1,224	1,277	1,379	1,795	2,718	3,560	4,990	0,991	0,779	0,969	9,4990
0,6000	0,368	1,072	1,361	1,421	1,540	2,015	3,051	3,985	5,573	1,117	0,877	1,076	11,399
0,7000	0,404	1,178	1,503	1,570	1,707	2,243	3,393	4,425	6,170	1,245	0,978	1,187	13,299
0,8000	0,441	1,286	1,652	1,727	1,882	2,482	3,748	4,881	6,785	1,379	1,082	1,302	15,198
0,9000	0,481	1,399	1,809	1,891	2,066	2,734	4,118	5,352	7,420	1,519	1,191	1,425	17,098
1,0000	0,524	1,517	1,974	2,065	2,261	2,997	4,503	5,837	8,073	1,665	1,305	1,554	18,998
1,2500	0,640	1,832	2,415	2,529	2,783	3,697	5,509	7,091	9,747	2,056	1,611	1,901	23,747
1,6000	0,827	2,321	3,097	3,243	3,583	4,755	6,999	8,930	12,152	2,664	2,093	2,445	30,397
2,0000	1,079	2,950	3,957	4,143	4,583	6,054	8,793	11,126	14,966	3,440	2,719	3,145	37,996
2,5000	1,453	3,840	5,140	5,386	5,944	7,789	11,149	13,974	18,568	4,525	3,608	4,133	47,495
3,2000	2,084	5,284	6,994	7,332	8,045	10,414	14,642	18,170	23,821	6,244	5,039	5,713	60,794
4,0000	2,950	7,217	9,395	9,840	10,730	13,712	18,961	23,329	30,226	8,484	6,929	7,785	75,992
5,0000	4,236	10,054	12,824	13,409	14,521	18,316	24,922	30,398	38,899	11,688	9,657	10,765	94,990
6,0000	5,732	13,344	16,725	17,463	18,811	23,475	31,540	38,208	48,398	15,337	12,778	14,172	113,99
7,0000	7,427	17,076	21,091	21,997	23,602	29,194	38,836	46,774	58,781	19,425	16,285	17,995	132,99
8,0000	9,318	21,247	25,917	27,001	28,897	35,480	46,827	56,117	70,057	23,948	20,174	22,223	151,98
9,0000	11,403	25,847	31,204	32,479	34,692	42,340	55,539	66,266	82,245	28,911	24,450	26,862	170,98
10,0000	13,683	30,853	36,948	38,427	40,980	49,776	64,962	77,229	95,363	34,315	29,111	31,909	189,98
11,0000	16,158	36,261	43,139	44,839	47,757	57,791	75,091	89,008	109,434	40,156	34,157	37,358	208,98
12,0000	18,829	42,072	49,777	51,714	55,023	66,384	85,920	101,596	124,464	46,432	39,586	43,210	227,98

Таблица 42.19. **Массовая тормозная способность веществ, МэВ/(мг·см$^{-2}$), для ионов неона $^{20}_{10}Ne^{+}$ [1]**

E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	3,548	2,935	2,150	1,430	1,161	1,054	0,976	0,903	0,574	0,491	0,452	0,387	0,2499
0,0160	4,014	3,320	2,432	1,618	1,314	1,192	1,104	1,022	0,649	0,556	0,511	0,438	0,3199
0,0200	4,487	3,712	2,720	1,809	1,469	1,333	1,235	1,142	0,726	0,621	0,571	0,490	0,3998
0,0250	5,017	4,150	3,041	2,022	1,642	1,490	1,380	1,277	0,812	0,695	0,640	0,547	0,4998
0,0320	5,669	4,699	3,440	2,288	1,861	1,692	1,562	1,445	0,918	0,788	0,726	0,623	0,6397
0,0400	6,323	5,265	3,846	2,565	2,092	1,908	1,758	1,627	1,035	0,890	0,819	0,704	0,7997
0,0500	7,043	5,904	4,300	2,881	2,361	2,150	1,982	1,836	1,165	1,013	0,933	0,802	0,9996
0,0600	7,679	6,498	4,705	3,171	2,607	2,367	2,188	2,028	1,299	1,129	1,042	0,898	1,1995
0,0700	8,242	7,050	5,072	3,439	2,840	2,577	2,384	2,211	1,420	1,243	1,151	0,989	1,3994
0,0800	8,749	7,581	5,407	3,693	3,055	2,768	2,558	2,379	1,541	1,352	1,249	1,076	1,5994
0,0900	9,207	8,081	5,715	3,932	3,258	2,961	2,726	2,538	1,663	1,455	1,349	1,163	1,7993
0,1000	9,630	8,526	6,000	4,158	3,456	3,132	2,880	2,694	1,776	1,554	1,440	1,242	1,9992
0,1250	10,534	9,719	6,625	4,664	3,896	3,531	3,246	3,041	2,037	1,782	1,666	1,441	2,4990
0,1600	11,502	11,179	7,331	5,249	4,413	4,002	3,673	3,445	2,346	2,060	1,932	1,686	3,1987
0,2000	12,301	12,484	7,946	5,777	4,887	4,426	4,061	3,806	2,638	2,328	2,185	1,907	3,9984
0,2500	12,946	13,617	8,500	6,282	5,338	4,845	4,437	4,157	2,933	2,593	2,431	2,125	4,9980
0,3200	13,431	14,592	9,002	6,778	5,788	5,284	4,816	4,501	3,223	2,863	2,687	2,363	6,3974
0,4000	13,664	15,169	9,346	7,122	6,131	5,608	5,112	4,776	3,477	3,094	2,907	2,551	7,9968
0,5000	13,728	15,427	9,600	7,421	6,432	5,904	5,376	5,011	3,706	3,302	3,106	2,736	9,9960
0,6000	13,495	15,199	9,626	7,537	6,565	6,045	5,487	5,111	3,821	3,417	3,220	2,859	11,995
0,7000	13,214	14,833	9,582	7,570	6,621	6,104	5,529	5,155	3,890	3,478	3,287	2,913	13,994
0,8000	12,894	14,376	9,495	7,568	6,637	6,143	5,555	5,175	3,931	3,532	3,333	2,962	15,994
0,9000	12,589	13,912	9,381	7,524	6,632	6,154	5,554	5,169	3,968	3,565	3,368	3,002	17,993
1,0000	12,275	13,440	9,250	7,483	6,605	6,133	5,541	5,152	3,978	3,580	3,286	3,025	19,992
1,2500	11,526	12,343	8,886	7,287	6,487	6,043	5,447	5,056	3,972	3,581	3,386	3,030	24,990
1,6000	10,587	11,097	8,363	6,983	6,239	5,829	5,252	4,850	3,889	3,521	3,328	2,985	31,987
2,0000	9,664	10,085	7,800	6,607	5,936	5,569	4,992	4,625	3,744	3,416	3,229	2,909	39,984
2,5000	8,704	9,121	7,176	6,164	5,576	5,238	4,686	4,349	3,574	3,251	3,086	2,799	49,980
3,2000	7,661	8,092	6 443	5,605	5,103	4,800	4,304	3,982	3,325	3,041	2,886	2,622	63,974
4,0000	6,747	7,186	5,767	5,069	4,642	4,371	3,939	3,633	3,074	2,814	2,682	2,439	79,968
5,0000	5,885	6,309	5,100	4,519	4,162	3,927	3,539	3,274	2,805	2,560	2,453	2,239	99,960
6,0000	5,233	5,626	4,574	4,080	3,764	3,568	3,220	2,978	2,552	2,356	2,255	2,072	119,95
7,0000	4,704	5,082	4,148	3,717	3,435	3,265	2,954	2,734	2,365	2,174	2,087	1,921	139,94
8,0000	4,279	4,632	3,797	3,417	3,163	3,007	2,734	2,525	2,195	2,024	1,944	1,792	159,94
9,0000	3,932	4,255	3,502	3,162	2,931	2,791	2,539	2,350	2,049	1,891	1,817	1,681	179,93
10,0000	3,634	3,933	3,250	2,948	2,730	2,603	2,369	2,200	1,918	1,778	1,713	1,583	199,92
11,0000	3,378	3,660	3,033	2,760	2,560	2,441	2,223	2,071	1,807	1,680	1,622	1,495	219,91
12,0000	3,159	3,420	2,843	2,593	2,408	2,300	2,095	1,956	1,709	1,592	1,535	1,416	239,90

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	8,063	3,440	2,279	2,141	1,903	1,256	0,770	0,546	0,360	2,883	3,668	2,799	0,2499
0,0160	8,951	3,775	2,537	2,386	2,121	1,433	0,888	0,632	0,420	3,242	4,125	3,116	0,3199
0,0200	9,736	3,998	2,766	2,605	2,331	1,618	1,009	0,734	0,491	3,595	4,572	3,397	0,3998
0,0250	10,581	4,199	3,016	2,843	2,572	1,846	1,180	0,860	0,623	3,983	5,069	3,703	0,4998
0,0320	11,730	4,451	3,299	3,141	2,869	2,150	1,397	1,053	0,733	4,472	5,704	4,094	0,6397
0,0400	12,884	4,684	3,588	3,454	3,181	2,485	1,646	1,262	0,896	4,981	6,354	4,500	0,7997
0,0500	14,233	5,005	3,952	3,844	3,578	2,885	1,944	1,514	1,097	5,564	7,095	4,997	0,9996
0,0600	15,716	5,378	4,362	4,216	3,985	3,280	2,230	1,755	1,289	6,122	7,816	5,496	1,1995
0,0700	17,194	5,823	4,768	4,631	4,392	3,662	2,495	1,983	1,466	6,665	8,501	6,026	1,3994
0,0800	18,763	6,299	5,196	5,050	4,807	4,039	2,768	2,206	1,638	7,202	9,176	6,575	1,5994
0,0900	20,289	6,807	5,630	5,487	5,224	4,406	3,029	2,423	1,795	7,727	9,825	7,133	1,7993
0,1000	21,960	7,368	6,108	5,916	5,628	4,770	3,294	2,622	1,944	8,238	10,476	7,698	1,9992
0,1250	26,302	8,778	7,254	6,989	6,678	5,638	3,882	3,094	2,299	9,500	12,091	9,136	2,4990
0,1600	32,474	10,827	8,885	8,562	8,122	6,766	4,640	3,695	2,742	11,194	14,221	11,216	3,1987
0,2000	39,016	12,952	10,608	10,187	9,631	7,827	5,324	4,227	3,123	12,825	16,274	13,390	3,9984
0,2500	46,070	15,249	12,368	11,909	11,118	8,789	5,942	4,658	3,426	14,399	18,250	15,708	4,9980
0,3200	53,471	17,455	14,196	13,548	12,396	9,497	6,337	4,942	3,610	15,861	20,146	17,986	6,3974
0,4000	58,319	19,253	15,290	14,533	13,159	9,823	6,495	5,056	3,682	16,757	21,337	19,402	7,9968
0,5000	61,248	20,352	15,811	15,043	13,459	9,898	6,528	5,098	3,715	17,213	21,974	20,179	9,9960
0,6000	61,122	20,502	15,516	14,746	13,177	9,635	6,391	4,986	3,648	16,960	21,763	19,896	11,995

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,7000	58,833	20,218	14,871	14,133	12,648	9,237	6,180	4,810	3,555	16,433	21,119	19,097	13,994
0,8000	55,737	19,560	14,138	13,483	12,049	8,812	5,963	4,653	3,456	15,800	20,282	18,174	15,994
0,9000	52,534	18,725	13,415	13,786	11,370	8,387	5,722	4,522	3,358	15,151	19,428	17,205	17,993
1,0000	49,858	18,028	12,867	12,210	10,878	8,057	5,550	4,422	3,284	14,550	18,639	16,391	19,992
1,2500	44,165	16,538	11,774	11,241	9,988	7,491	5,261	4,240	3,208	13,303	16,893	14,902	24,990
1,6000	37,799	14,802	10,687	10,219	9,149	6,983	5,009	4,073	3,153	11,917	14,911	13,280	31,987
2,0000	32,292	13,237	9,812	9,344	8,455	6,568	4,797	3,939	3,097	10,764	13,260	11,895	39,984
2,5000	27,125	11,661	8,905	8,475	7,822	6,186	4,593	3,825	3,043	9,659	11,690	10 549	49,980
3,2000	22,550	10,019	7,944	7,583	7,042	5,702	4,336	3,608	2,893	8,524	10,160	9,245	63,970
4,0000	19,031	8,604	7,036	6,747	6,344	5,190	3,979	3,351	2,710	7,532	8,875	8,114	79,968
5,0000	16,218	7,369	6,166	5,936	5,595	4,636	3,606	3,045	2,499	6,599	7,726	7,079	99,960
6,0000	14,225	6,468	5,498	5,287	5,008	4,181	3,266	2,776	2,287	5,873	6,856	6,280	119,95
7,0000	12,736	5,783	4,970	4,791	4,530	3,808	2,995	2,555	2,112	5,306	6,177	5,675	139,94
8,0000	11,543	5,221	4,537	4,378	4,135	3,489	2,745	2,354	1,955	4,837	5,620	5,175	159,94
9,0000	10,540	4,790	4,171	4,027	3,810	3,222	2,539	2,182	1,821	4,440	5,151	4,752	179,93
10,0000	9,718	4,436	3,871	3,738	3,536	2,990	2,363	2,031	1,700	4,108	4,758	4,401	199,92
11,0000	9,007	4,130	3,612	3,488	3,300	2,790	2,211	1,901	1,592	3,824	4,425	4,100	219,91
12,0000	8,387	3,864	3,386	3,270	3,093	2,616	2,078	1,788	1,498	3,577	4,131	3,838	239,90

42.2. МНОГОКРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

В результате взаимодействия с атомным электроном заряженная частица, движущаяся в веществе, изменяет направление своего движения. В единичном акте взаимодействия угол отклонения, как правило, очень мал, но статистическое сложение углов отклонения при большом числе столкновений с атомными электронами приводит к тому, что параллельный пучок частиц пройдя некоторую толщу вещества, становится расходящимся пучком. Угловое распределение в пучке, т. е. зависимость потока от угла отклонения относительно первоначальной оси пучка, хорошо описывается распределением Гаусса

$$F = F_0 \exp\left(-\theta^2 / \theta_0^2\right),$$

где F — поток под углом θ; F_0 — поток под углом 0° относительно оси пучка; θ_0 — угол, под которым поток падает в e раз. Угол θ называют углом многократного рассеяния, и в качестве характеристики размытия пучка пользуются углом θ_0.

В современном виде теория многократного рассеяния изложена в работах [4, 5]. Параметрами теории являются величины

$$\chi_c = 0{,}1569\,\frac{Z(Z+1)\,z^2 t}{A\,(pv)^2};$$

$$b = \ln\left[2730\,(Z+1)Z^{1/3}z^2 t/(A\beta^2)\right] - 0{,}1544.$$

В этих выражениях z и Z — атомные номера падающей частицы и рассеивателя; A — атомная масса рассеивателя; t — толщина рассеивателя, г/см²; pv — произведение импульса на скорость падающей частицы; $\beta = v/c$ (c — скорость света); $(pv)^2 = (E^2 + 2EMc^2)\,\beta$ и $\beta^2 = 1 - (1 + E/Mc^2)^{-2}$; E и Mc^2 — энергия и масса покоя падающей частицы, МэВ.

Для определения угла многократного рассеяния θ_0, соответствующего спаду потока в e раз, нужно:

1) вычислить χ_c и b;

2) по вычисленному значению b найти из графика на рис. 42.1 значение параметра $\varkappa$;

3) вычислить $\theta = \varkappa\chi_c$, рад.

Таблица 42.20. **Пробег R, мг/см², ионов неона $^{20}_{10}Ne^+$ в различных веществах [1]**

E_m — энергия на единицу массы падающей частицы; E — полная энергия

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,0125	0,079	0,087	0,121	0,181	0,212	0,253	0,279	0,312	0,483	0,573	0,626	0,753	0,2499
0,0160	0,096	0,107	0,147	0,220	0,257	0,305	0,335	0,373	0,577	0,683	0,745	0,894	0,3199
0,0200	0,114	0,127	0,175	0,260	0,306	0,360	0,394	0,437	0,676	0,798	0,871	1,041	0,3998
0,0250	0,133	0,151	0,207	0,307	0,362	0,423	0,462	0,511	0,790	0,930	1,014	1,210	0,4998
0,0320	0,158	0,181	0,247	0,367	0,434	0,503	0,549	0,604	0,935	1,100	1,198	1,424	0,6397
0,0400	0,184	0,211	0,289	0,428	0,509	0,586	0,638	0,701	1,085	1,274	1,387	1,645	0,7997
0,0500	0,213	0,246	0,336	0,498	0,593	0,679	0,739	0,811	1,255	1,470	1,600	1,893	0,9996
0,0600	0,240	0,277	0,379	0,562	0,670	0,764	0,831	0,910	1,409	1,647	1,791	2,116	1,1995
0,0700	0,265	0,306	0,418	0,620	0,740	0,842	0,915	1,001	1,550	1,808	1,965	2,319	1,3994
0,0800	0,288	0,333	0,456	0,675	0,806	0,915	0,994	1,085	1,680	1,957	2,125	2,505	1,5994
0,0900	0,310	0,358	0,491	0,726	0,867	0,983	1,067	1,164	1,801	2,095	2,274	2,678	1,7993
0,1000	0,331	0,382	0,525	0,775	0,925	1,047	1,137	1,239	1,914	2,224	2,414	2,840	1,9992
0,1250	0,381	0,437	0,604	0,888	1,059	1,195	1,297	1,410	2,171	2,517	2,729	3,204	2,4990
0,1600	0,444	0,504	0,704	1,029	1,225	1,378	1,497	1,623	2,482	2,876	3,111	3,645	3,1987
0,2000	0,511	0,571	0,808	1,174	1,395	1,566	1,701	1,841	2,802	3,236	3,495	4,084	3,9984

E_m, МэВ/а.е.м.	Be	C	Al	Ti	Ni	Ge	Zr	Ag	Eu	Ta	Au	U	E, МэВ
0,2500	0,591	0,648	0,930	1,340	1,588	1,781	1,935	2,090	3,158	3,638	3,924	4,575	4,9980
0,3200	0,696	0,747	1,089	1,553	1,839	2,057	2,237	2,413	3,612	4,151	4,470	5,198	6,3974
0,4000	0,814	0,854	1,263	1,783	2,107	2,351	2,558	2,757	4,089	4,687	5,041	5,849	7,9968
0,5000	0,960	0,985	1,474	2,058	2,425	2,698	2,939	3,165	4,645	5,312	5,706	6,605	9,9960
0,6000	1,107	1,115	1,682	2,325	2,733	3,032	3,307	3,560	5,176	5,907	6,338	7,319	11,995
0,7000	1,256	1,248	1,890	2,590	3,036	3,361	3,670	3,949	5,694	6,486	6,952	8,011	13,994
0,8000	1,410	1,385	2,100	2,854	3,337	3,687	4,031	4,336	6,205	7,056	7,556	9,692	15,994
0,9000	1,566	1,526	2,311	3,119	3,639	4,012	4,390	4,723	6,711	7,620	8,152	9,362	17,993
1,0000	1,727	1,673	2,526	3,385	3,941	4,338	4,751	5,110	7,214	8,179	8,744	10,025	19,992
1,2500	2,147	2,061	3,077	4,062	4,704	5,158	5,660	6,089	8,471	9,574	10,220	11,675	24,990
1,6000	2,781	2,658	3,889	5,042	5,804	6,337	6,968	7,502	10,251	11,544	12,304	14,001	31,987
2,0000	3,572	3,415	4,879	6,220	7,118	7,741	8,530	9,190	12,347	13,850	14,743	16,714	39,984
2,5000	4,662	4,458	6,216	7,787	8,857	9,593	10,598	11,420	15,081	16,851	17,911	20,218	49,980
3,2000	6,379	6,089	8,277	10,171	11,483	12,387	13,718	14,787	19,145	21,306	22,604	25,389	63,974
4,0000	8,607	8,190	10,905	13,176	14,774	15,883	17,608	18,998	24,154	26,780	28,360	31,720	79,968
5,0000	11,786	11,165	14,599	17,361	19,330	20,717	22,971	24,805	30,973	34,240	36,166	40,287	99,960
6,0000	15,395	14,526	18,744	22,024	24,389	26,066	28,902	31,216	38,456	42,391	44,678	49,580	119,95
7,0000	19,429	18,270	23,340	27,164	29,955	31,930	35,391	38,231	46,602	51,235	53,904	59,612	139,94
8,0000	23,890	22,395	28,382	32,779	36,026	38,317	42,433	45,848	55,386	60,775	63,838	70,397	159,94
9,0000	28,768	26,902	33,869	38,865	42,598	45,223	50,028	54,062	64,822	71,002	74,482	81,923	179,93
10,0000	34,060	31,793	39,799	45,418	49,670	52,645	58,185	62,860	74,915	81,913	85,820	94,188	199,92
11,0000	39,770	37,066	46,171	52,432	57,237	60,580	66,901	72,230	85,660	93,487	97,819	107,191	219,91
12,0000	45,893	42,719	52,984	59,909	65,294	69,021	76,169	82,167	97,042	105,717	110,492	120,938	239,90

E_m, МэВ/а.е.м.	H	He	N	O	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn	Майлар	$(CH_2)_n$	Вода	E, МэВ
0,0125	0,028	0,074	0,104	0,110	0,122	0,189	0,320	0,471	0,735	0,084	0,066	0,081	0,2499
0,0160	0,035	0,091	0,129	0,136	0,151	0,231	0,387	0,566	0,879	0,104	0,082	0,101	0,3199
0,0200	0,043	0,109	0,155	0,164	0,182	0,276	0,458	0,664	1,024	0,125	0,098	0,122	0,3998
0,0250	0,051	0,132	0,186	0,197	0,218	0,327	0,538	0,774	1,181	0,149	0,117	0,147	0,4998
0,0320	0,063	0,162	0,227	0,240	0,265	0,391	0,636	0,906	1,366	0,180	0,141	0,180	0,6397
0,0400	0,075	0,195	0,271	0,285	0,314	0,465	0,733	1,034	1,547	0,212	0,167	0,215	0,7997
0,0500	0,089	0,235	0,321	0,337	0,371	0,527	0,839	1,170	1,737	0,248	0,195	0,255	0,9996
0,0600	0,102	0,272	0,368	0,385	0,421	0,589	0,930	1,288	1,897	0,281	0,221	0,292	1,1995
0,0700	0,113	0,307	0,410	0,429	0,467	0,645	1,012	1,391	2,038	0,312	0,245	0,326	1,3994
0,0800	0,124	0,339	0,449	0,469	0,510	0,696	1,086	1,484	2,163	0,340	0,267	0,357	1,5994
0,0900	0,134	0,369	0,485	0,506	0,549	0,742	1,154	1,569	2,277	0,366	0,288	0,385	1,7993
0,1000	0,144	0,397	0,519	0,541	0,585	0,786	1,216	1,648	2,384	0,392	0,308	0,412	1,9992
0,1250	0,164	0,459	0,594	0,618	0,666	0,882	1,355	1,823	2,620	0,448	0,352	0,471	2,4990
0,1600	0,188	0,530	0,681	0,709	0,761	0,995	1,520	2,030	2,898	0,516	0,405	0,540	3,1987
0,2000	0,211	0,598	0,763	0,794	0,851	1,105	1,680	2,232	3,171	0,582	0,458	0,605	3,9984
0,2500	0,234	0,669	0,850	0,885	0,948	1,225	1,858	2,457	3,476	0,656	0,516	0,674	4,9980
0,3200	0,262	0,754	0,955	0,994	1,067	1,378	2,085	2,747	3,873	0,748	0,589	0,757	6,3974
0,4000	0,291	0,841	1,064	1,108	1,192	1,543	2,334	3,067	4,311	0,846	0,666	0,843	7,9968
0,5000	0,324	0,942	1,192	1,243	1,342	1,746	2,641	3,460	4,850	0,964	0,758	0,944	9,9960
0,6000	0,357	1,040	1,320	1,377	1,492	1,950	2,950	3,856	5,393	1,080	0,849	1,043	11,995
0,7000	0,390	1,138	1,451	1,516	1,647	2,162	3,268	4,264	5,948	1,200	0,942	1,146	13,994
0,8000	0,425	1,239	1,589	1,661	1,808	2,384	3,597	4,687	6,518	1,324	1,039	1,253	15,994
0,9000	0,462	1,343	1,734	1,813	1,979	2,616	3,939	5,123	7,105	1,453	1,140	1,366	17,993
1,0000	0,501	1,452	1,886	1,973	2,159	2,859	4,294	5,570	7,707	1,588	1,245	1,485	19,992
1,2500	0,608	1,741	2,292	2,399	2,638	3,502	5,219	6,723	9,246	1,947	1,526	1,805	24,990
1,6000	0,779	2,189	2,916	3,052	3,370	4,470	6,582	8,405	11,446	2,503	1,967	2,302	31,987
2,0000	1,008	2,760	3,697	3,871	4,280	5,651	8,213	10,401	14,005	3,209	2,536	2,939	39,984
2,5000	1,346	3,566	4,768	4,995	5,510	7,220	10,344	12,977	17,262	4,191	3,340	3,832	49,980
2,2000	1,913	4,863	6,434	6,743	7,398	9,579	13,482	16,748	21,982	5,735	4,626	5,251	63,974
4,0000	2,686	6,588	8,577	8,983	9,795	12,523	17,338	21,353	27,699	7,735	6,313	7,101	79,968
5,0000	3,827	9,105	11,618	12,148	13,157	16,606	22,624	27,622	35,392	10,576	8,732	9,744	99,960
6,0000	5,145	12,005	15,057	15,722	16,940	21,154	28,459	34,508	43,766	13,792	11,484	12,746	119,95
7,0000	6,633	15,279	18,887	19,699	21,142	26,171	34,858	42,022	52,873	17,378	14,560	16,101	139,94
8,0000	8,283	18,921	23,101	24,068	25,766	31,660	41,837	50,180	62,721	21,329	17,956	19,793	159,94
9,0000	10,098	22,922	27,701	28,834	30,807	37,628	49,416	59,009	73,324	25,646	21,675	23,828	179,93
10,0000	12,074	27,262	32,680	33,990	36,258	44,074	57,584	68,513	84,695	30,330	25,717	28,203	199,92
11,0000	14,213	31,935	38,030	39,531	42,114	51,000	66,337	78,691	96,855	35,378	30,077	32,913	219,91
12,0000	16,514	36,942	43,750	45,455	48,375	58,405	75,668	89,539	109,805	40,786	34,755	37,955	239,90

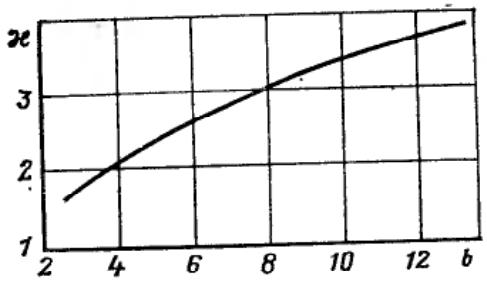


Рис. 42.1. Связь между параметрами $\varkappa$ и b, используемыми при расчете угла многократного рассеяния

Рис. 42.2. Пробег электронов в алюминии

42.3. ПРОХОЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Электроны, проходя через вещество, теряют энергию, главным образом, на ионизацию, возбуждение атомов вещества и на тормозное излучение. В каждом акте взаимодействия с атомными электронами для падающего электрона велика вероятность потерять существенную долю своей энергии и выбыть из пучка вследствие рассеяния на большой угол. Поэтому для электроиов нет понятия среднего пробега в веществе, а говорят лишь о максимальной глубине проникновения (или экстраполированном пробеге). Достаточно точной теории, позволяющей получить формулу потерь энергии для электронов, нет.

Для оценки глубины проникновения моноэнергетического пучка электронов пользуются эмпирическими формулами. Например, для пробега R (мг/см$_2$) электронов в алюминии в [6] рекомендована формула

$$R = 412\,[E]^n,\ 0{,}01 \leqslant E \leqslant 3\ \text{МэВ},$$

где $n = 1{,}265 - 0{,}0954\ \ln E$ (МэВ); $R = 530\ E - 106$ мг/см^2; $3 \leqslant E \leqslant 20$ МэВ.

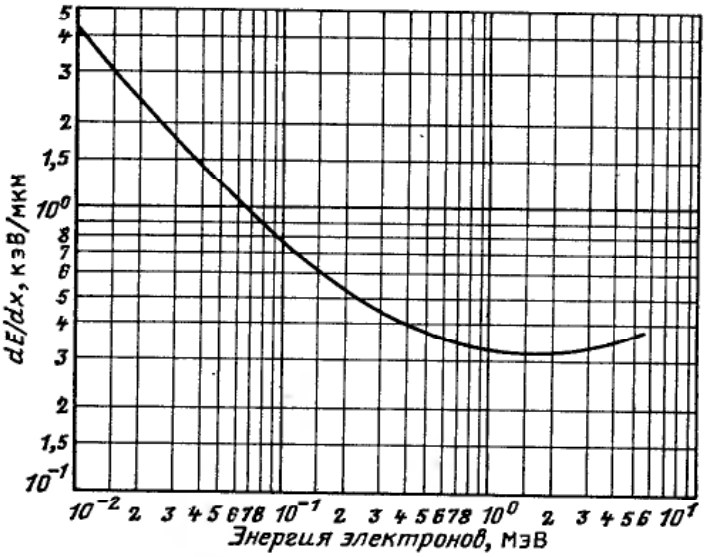


Рис. 42.3. Удельные потери энергии электронов в кремнии

Построенный на основе этих формул график приведен на рис. 42.2. Поскольку экстраполированный пробег, мг/см^2, слабо зависит от вещества, этим графиком можно пользоваться для оценки пробегов электронов и в других веществах, вводя поправку с помощью соотношения

$$R_x = R_{\text{Al}} \frac{(Z/A)_{\text{Al}}}{(Z/A)_x},$$

где R и Z/A — пробег и отношение заряда к массе для Al и элемента x.

На рис. 42.3 приведен график [7] удельных потерь энергии электронов для кремния — материала, широко используемого для изготовления детекторов излучений. Из этого же графика можно получить удельные потери энергии электронов в других веществах. Для этого значение потерь, полученное из графика, следует умножить на отношение плотности данного вещества к плотности кремния (2,33 г/см^3).

Электроны, родившиеся при β-распаде радионуклидов, обладают сплошным энергетическим спектром с максимальной энергией $E_{\max}$. При прохождении через вещество пучок β-частиц ослабляется приблизительно по экспоненциальному закону:

$$F = F_0 \exp(-\mu_m x),$$

где x — толщина поглотителя, г/см^2; μ_m — массовый коэффициент поглощения электронов, см^2/г, приближенно представляемый в виде $\mu_m = 15{,}5\ E^{-1{,}41}$ см^2/г [8].

42.4. ПРОХОЖДЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

При прохожденни γ-излучения через вещество наиболее интенсивно протекают три процесса: фотоэффект, комптон-эффект и рождение электронно-позитронных пар. Каждый из этих процессов приводит к удалению фотона из пучка. Поэтому ослабление узкого пучка моноэнергетнческих фотонов описывается экспонентой

$$F = F_0 \exp(-\mu_m x),$$

где x — толщнна вещества, г/см^2; μ_m — массовый коэффицнент ослаблення, см^2/г.

Массовые коэффнцненты ослабления для разлнчных веществ приведены на рнс. 42.4 [9], а зависимостн толщины защиты из различных материалов от кратности ослабления и энергии γ-излучения — в табл. 42.21—42.24.

Таблица 42.21. **Толщина защиты из свинца, мм, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок)** [8]

Кратность ослабления	Энергия γ-излучения, МэВ															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2	3	4	6	10
2	1	2	3	4	5	7	8	10	11,5	13	17	20	21	20	16	13,5
5	2	4	6	9	11	15	19	22	25	28	38	43	46	45	38	30
10	3	5,5	9	13	16	21	26	30,5	35	38	51	59	65	64	55	42
30	3,5	7	11,5	17	23	30	36,5	43	49,5	55	73	85	93	92	80	63
100	5	10	16	23	30	38,5	47	55	63	70	96,5	113	122	121	109	87
500	6,5	14	22	31	40	51	61	72	82	92	129	150	163	161	149	119
10^3	7	15	24	33	44	57	69,5	81	92	102	141	165	160	178	165	133
$5 \cdot 10^3$	9	19	30	42	55	70	85	99	112	124	170	198	219	217	203	166
10^4	10,5	21	33	45,5	59	75	91	106	120	133	183	213	236	234	220	180
$5 \cdot 10^4$	11,5	23,5	37	52	69	87	105	123	140	156	214	247	263	272	258	215
10^5	11,5	24	38	54	72	92	111	130	148	165	227	262	289	289	275	229

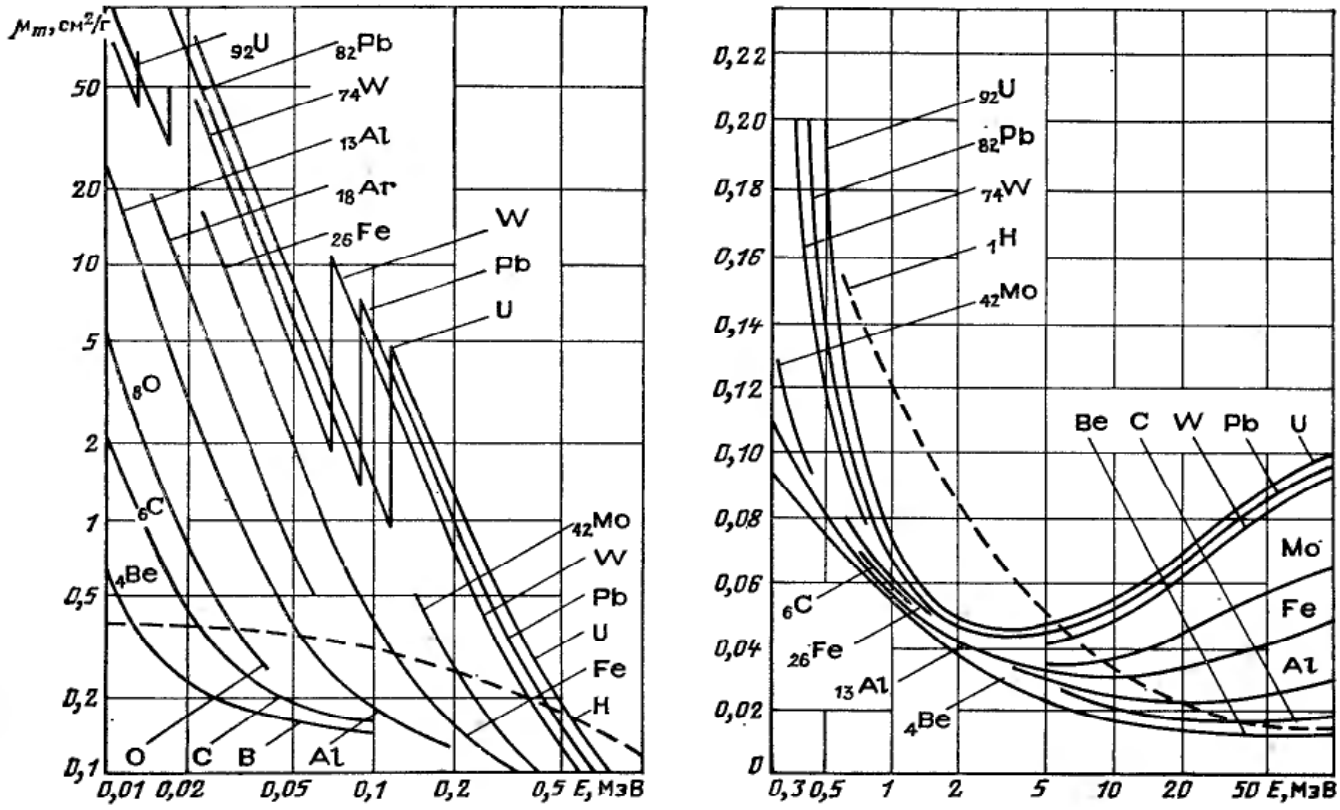


Рис. 42.4. Массовый коэффициент ослабления узкого пучка γ-излучения в различных веществах в зависимости от энергии γ-излучения

Таблица 42.22. **Зависимость толщины защиты из железа от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок)** [8]

Кратность ослабления	Толщина защиты, см, при E_γ, МэВ															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	3,0	4	6	10
2	0,7	1,2	1,7	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,3	3,6	3,9	4,4	4,5	4,6	3,4
5	1,4	2,5	3,4	4,1	4,8	5,1	5,5	5,7	6,1	6,4	7,4	8,1	8,9	9,4	9,6	8,0
10	1,9	3,5	4,6	5,6	6,3	6,8	7,3	7,7	8,1	8,5	10,0	11,0	12,2	12,6	13,2	11,4
30	2,4	4,5	6,2	7,9	8,5	9,2	9,8	10,4	10,9	11,4	13,6	15,1	17,0	17,7	18,8	17,0
100	3,4	6,1	8,1	9,6	10,8	11,7	12,5	13,2	13,9	14,5	17,3	19,5	22,1	23,3	25,0	23,1
500	4,4	7,7	10,1	12,0	13,7	14,9	16,0	17,0	17,9	18,7	22,3	25,0	28,8	30,6	32,7	31,2
10^3	4,5	8,2	11,0	13,2	15,0	16,3	17,5	18,6	19,6	20,5	24,4	27,5	31,7	33,7	36,0	34,6
$5 \cdot 10^3$	5,6	10,1	13,4	15,8	17,7	19,3	20,7	22,0	23,2	24,3	29,4	33,3	38,2	40,7	43,2	42,2
10^4	6,8	11,5	14,2	17,1	19,0	20,7	22,3	23,6	24,9	26,0	31,3	35,5	40,9	43,7	46,5	45,2
$5 \cdot 10^4$	8,6	13,8	17,0	19,6	21,8	23,6	25,2	26,9	29,4	29,9	35,9	40,8	47,2	50,4	55,0	53,0
10^5	10,0	15,8	18,2	20,8	23,0	24,9	26,7	28,4	30,0	31,5	38,0	43,2	50,0	53,4	58,3	56,1
10^6	12,8	17,9	21,4	24,2	26,7	28,9	31,2	33,3	35,2	37,0	44,7	50,6	58,8	63,3	69,0	67,0
10^7	15,0	20,3	24,3	27,6	30,5	33,2	35,8	38,1	40,2	42,4	51,3	57,9	67,5	73,1	79,4	78,0

Таблица 42.23. **Зависимость толщины защиты из бетона от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок) [8]**

Кратность ослабления	Толщина защиты, см, при E_γ, МэВ															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2	3	4	6	10
2	4,7	7,6	9,9	11,3	12,3	12,4	12,4	12,6	12,7	12,9	13,6	14,1	15,3	16,4	18,8	18,8
5	5,6	11,0	15,5	18,8	21,1	21,8	22,3	22,6	23,0	23,5	25,8	28,2	32,9	35,2	38,7	39,9
10	8,2	14,6	19,7	23,7	25,8	26,8	27,6	28,4	29,1	29,9	34,0	37,6	43,4	47,5	51,6	54,0
30	8,5	16,4	22,8	27,7	32,9	34,8	36,4	37,8	39,2	40,5	46,5	51,6	59,9	65,7	71,6	78,1
100	11,5	21,1	48,9	35,2	39,9	43,0	45,3	47,2	48,8	50,5	58,3	65,7	77,5	84,5	95,1	105,1
500	13,8	24,6	35,2	43,9	50,5	54,5	57,3	58,8	62,5	64,6	74,8	84,5	101,0	110,4	124,4	139,7
10^3	15,5	28,2	39,2	48,1	55,2	59,2	62,5	65,3	76,8	70,4	81,7	92,7	110,9	120,9	137,9	155,0
$5\cdot10^3$	18,8	33,1	45,6	56,4	65,7	70,0	74,0	77,0	80,2	82,8	97,4	110,9	132,7	146,8	166,7	186,7
10^4	21,8	35,2	48,5	60,3	69,3	74,7	79,1	82,9	85,2	89,2	104,5	118,6	143,2	156,7	179,0	201,3
$5\cdot10^4$	23,3	42,3	56,4	68,6	78,1	83,4	88,7	93,4	97,9	102,1	120,4	136,2	164,9	181,6	206,6	233,6
10^5	30,5	50,5	64,6	75,1	82,8	83,3	93,5	98,1	102,5	106,8	126,6	144,4	173,8	191,4	218,4	248,9
10^6	49,3	66,4	79,8	89,9	97,4	103,7	109,2	114,1	119,5	124,4	149,8	171,4	205,4	225,4	260,6	295,8
10^7	64,0	84,9	15,7	130,7	110,3	117,4	123,6	130,0	136,2	142,0	170,8	194,9	236,0	259,4	299,4	340,5

Таблица 42.24. **Зависимость толщины защиты из воды от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок) [8]**

Кратность ослабления	Толщина защиты, см, при E_γ, МэВ															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2	3	4	6	10
2	18	27	30	30	29	28	27	27	26	26	28	33	37	38	40	45
5	27	37	42	44	46	46	47	47	48	48	53	59	69	74	85	98
10	35	47	52	55	57	58	60	61	62	63	71	79	92	101	116	135
30	45	58	65	69	73	75	77	79	81	82	96	107	124	140	163	192
100	53	70	79	84	88	92	95	98	101	104	120	136	160	182	212	253
500	66	85	96	104	110	116	120	124	128	132	153	173	206	234	277	334
10^3	72	92	104	113	118	124	129	134	138	143	167	189	226	257	306	368
$5\cdot10^3$	81	105	120	130	138	147	154	160	165	170	198	225	271	309	368	446
10^4	91	114	128	139	147	155	162	168	175	181	212	241	290	331	396	480
$5\cdot10^4$	103	128	144	156	167	175	183	190	196	205	241	276	334	383	460	554
10^5	110	135	152	164	175	184	192	201	204	216	255	292	353	404	487	587
10^6	128	156	176	192	205	215	224	233	243	253	299	342	415	479	571	695
10^7	150	178	200	217	232	243	255	265	277	288	344	393	478	554	657	807

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Northclifte L. C., Schilling R. F.**//Nuclear Data Tables. 1970. Vol. A7. P. 233—273.

2. **Немец О. Ф., Гофман Ю. В.** Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975.

3. **Пучеров Н. Н., Романовский С. В., Чесиокова Т. Д.** Таблицы массовой тормозной способности и пробегов заряженных частиц с энергией 1—100 МэВ. Киев: Наукова думка, 1976.

4. **Nigam B. P., Sandersan M. K., Wu T.-W.**//Phys. Rev. 1959. Voll. 115. P. 491—498.

5. **Marion I. B., Zimmerman B. A.**//Nucl. Instrum. and Methods. 1967. Vol. 51. P. 93—97.

6. **Katz L., Penfold A. S.**//Rev. Mod. Phys. 1952. Vol. 24. P. 28—35.

7. **Marion I. B., Young F. C.** Nuclear Reaction Analysis: Graphs and Tables. Amsterdam: North Holland Publishing Co., 1968.

8. **Аглинцев К. К., Кодюков В. М.** Прикладная дозиметрия. М.: Госатомиздат, 1962.

9. **Прайс В., Хортон К., Спинни К.** Защита от ядерных излучений. М.: Изд-во иностр. лит., 1959.

ГЛАВА 43
КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

В. С. Птускин

43.1. ИСТОЧНИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Космические лучи (КЛ) — элементарные частицы и атомные ядра высоких энергий космического происхождения. К космическим лучам также относят частицы, рожденные в атмосфере Земли первичными КЛ в результате взаимодействий с ядрами атомов воздуха. Наблюдаются КЛ с энергиями на одну частицу от 10^6 до 10^{20} эВ.

Основная доля падающих на границу атмосферы КЛ имеет галактическое происхождение (галактические КЛ). Источниками этих частиц являются сверхновые и их остатки (включая нейтронные звезды) [1, 2]. Часть КЛ (в основном с энергиями 10^6—10^9 эВ) приходит к Земле от Солнца. Солнечные КЛ ускоряются во время сильных хромосферных вспышек и других активных процессов на Солнце [3]. Частицы самых высоких наблюдаемых энергий ($E > 10^{17} \div 10^{19}$ эВ), возможно, имеют внегалактическое происхождение. Они ускоряются в активных галактиках [2]. Источником электронов с энергиями $E < 3 \cdot 10^7$ эВ в межпланетной среде является магнитосфера Юпитера [4]. При энергиях 10^6—10^8 эВ обнаружена так называемая аномальная ядерная компонента КЛ. Эти частицы ускоряются во внешних областях гелиосферы — на внешних границах области, занятой солнечным ветром [5].

Единицей интегральной плотности потока КЛ I служит $с^{-1} \cdot м^{-2} \cdot ср^{-1}$. Энергия частицы E измеряется в электрон-вольтах, для ядер используют также величину $\varepsilon = E/A$, эВ/нуклон, — энергию на нуклон (A — атомный номер ядра). *Жесткость* заряженной частицы с импульсом p, кг·м/с, и зарядом Ze, Кл, равна $R = pc/Ze$; обычно R измеряют в вольтах. Импульс частицы, эВ/c (c — скорость света), численно равен жесткости в вольтах, если частица однозарядна, т. е. $Z = 1$. Ниже приведены общие сведения о КЛ [6]:

Плотность потока КЛ вне области влияния магнитного поля Земли, $с^{-1} \cdot м^{-2}$	$(3 \div 6) \cdot 10^3$
Концентрация первичных КЛ в межзвездном пространстве, $м^{-3}$	10^{-4}
Плотность энергии первичных КЛ в межзвездном пространстве, Дж/$м^3$	$1{,}6 \cdot 10^{-13}$
Плотность пар ионов, образуемых КЛ на уровне моря (в среднем), $с^{-1} \cdot м^{-3}$	$1{,}6 \cdot 10^6$
Общая мощность КЛ, достигающих поверхности Земли, Вт	$4 \cdot 10^8$

43.2. ГАЛАКТИЧЕСКИЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Приведем параметры галактической модели происхождения КЛ [2]:

Полная мощность галактических источников КЛ, Вт	$3 \cdot 10^{33}$
Высота галактического гало КЛ (область захвата КЛ в Галактике), кпк (1 пк $\approx$ $\approx 3 \cdot 10^{16}$ м)	1—10
Время удержания КЛ в Галактике, лет	10^7—10^8
Средняя толща вещества, проходимая КЛ в Галактике, кг/$м^2$	50—100

Плотность потока КЛ в зависимости от энергии частиц показана на рис. 43.1—43.4. Характерна степенная зависимость $I(E)$. Наблюдаемый у Земли энергетический спектр КЛ в области малых энергий меняется в зависимости от уровня солнечной активности (см. § 43.3).

Первые наблюдения антипротонов в составе КЛ [12—14] показали, что плотность потока антипротонов составляет по отношению к плотности потока протонов $(6{,}8 \pm 1{,}7) \cdot 10^{-4}$ при $4{,}4 \leqslant E \leqslant 13{,}4$ ГэВ [13] и $(0{,}6\ ^{+1{,}4}_{-0{,}5}) \cdot 10^{-4}$ при $0{,}2 \leqslant E \leqslant 2{,}0$ ГэВ [14], что возможно в 2—3 раза превышает ожидаемую плотность потока вторичных антипротонов, рождающихся при взаимодействии КЛ с ядрами межзвездного газа. Абсолютная плотность потока антипротонов на границе атмосферы равна $(3{,}8 \pm 0{,}95) \cdot 10^{-2}$ $с^{-1} \cdot м^2 \cdot ср^{-1} \cdot ГэВ^{-1}$ при $4{,}7 \leqslant E \leqslant 11{,}3$ ГэВ [13].

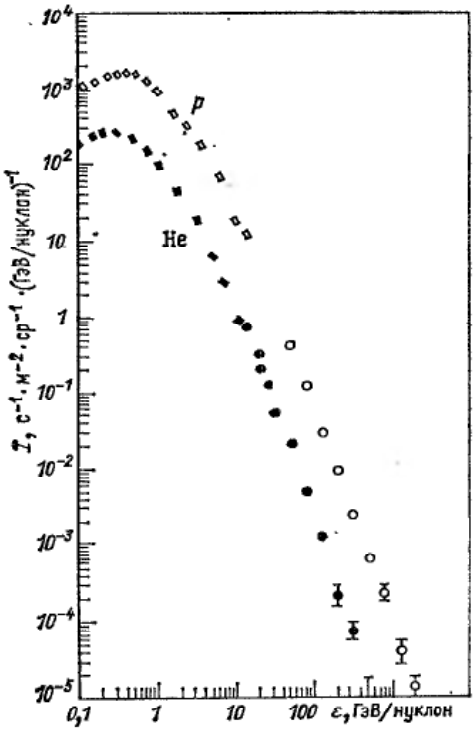


Рис. 43.1. Спектры протонов и ядер He в КЛ [7]

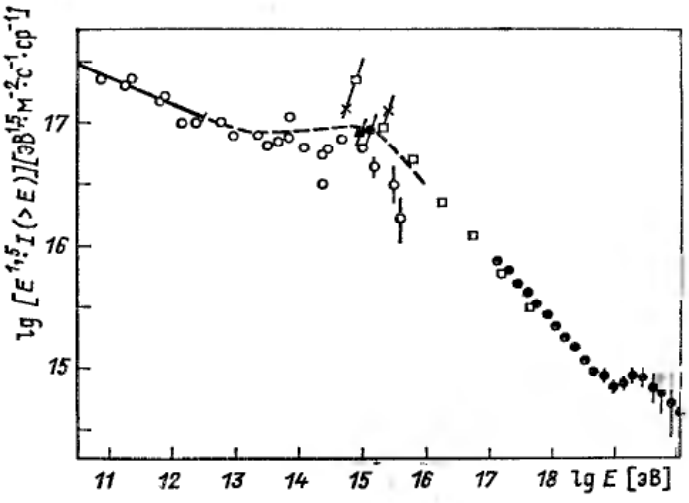


Рис. 43.2. Спектр КЛ высоких энергий [8]

Детальная информация о составе ядер в КЛ получена лишь для энергий частиц до 10 ГэВ/нуклон [15].

Плотность потока различных ядер в составе КЛ с энергиями 600—1000 МэВ/нуклон на границе атмосферы по измерениям, выполненным в сентябре 1977 г. [16], составляет:

Элемент	I, $с^{-1}\cdot м^{-2}\cdot ср^{-1}$	Элемент	I, $с^{-1}\cdot м^{-2}\cdot ср^{-1}$
He	54,08 (1,10)	Si	0,202 (4)
C	1,52 (3)	S	0,0467 (19)
N	0,42 (1)	Ar	0,0205 (12)
O	1,41 (3)	Ca	0,0323 (15)
Ne	0,228 (5)	Cr	0,0240 (15)
Na	0,51 (2)	Fe	0,142 (4)
Mg	0,282 (6)	Ni	0,0074 (9)
Al	0,056 (2)		

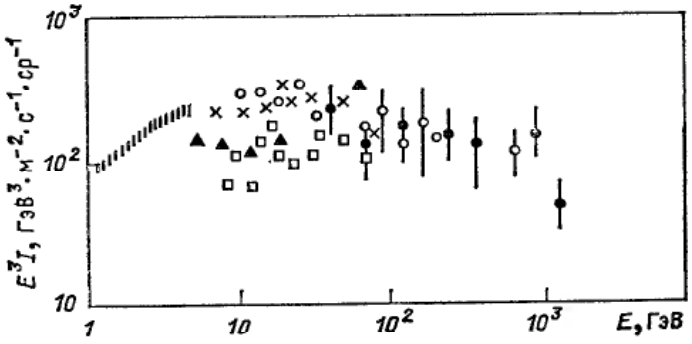


Рис. 43.3. Энергетический спектр электронной компоненты КЛ [9, 10]

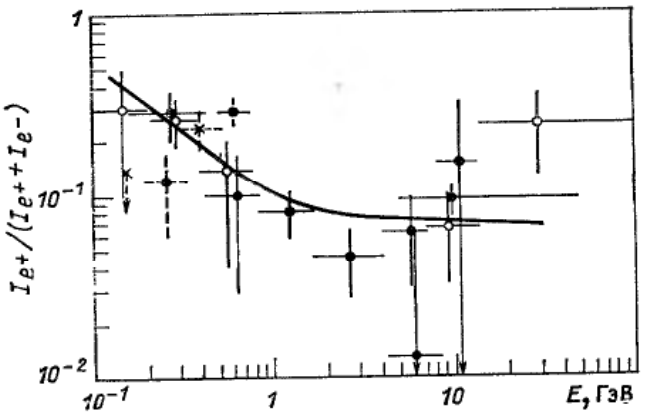


Рис. 43.4. Относительная плотность потока релятивистских позитронов в КЛ [11]. Эти позитроны вторичны, т. е. возникают в основном при распадах π^+-мезонов, рождающихся при взаимодействии протонно-ядерной компоненты КЛ с атомными ядрами межзвездного газа

Высокое содержание в составе КЛ ядер Li, Be, B, элементов с зарядом ядра $21 \leqslant Z \leqslant 25$ и других редких в природе элементов и их изотопов (рис. 43.5, 43.6) объясняется тем, что они вторичны — возникают при фрагментации более тяжелых ядер, взаимодействующих с атомными ядрами межзвездного газа. Доля вторичных ядер уменьшается с энергией (рис. 43.7), что связано с соответствующим уменьшением времени удержания КЛ в Галактике. Определенный с учетом поправки на фрагментацию состав первичных ядер КЛ в источниках приведен в табл. 43.1.

Таблица 43.1. **Относительный состав первичных КЛ в галактических [20] и солнечных [21] источниках КЛ. Концентрация ядер кремния условно принята за 100 единиц**

Элемент	Источники галактических КЛ	Солнечные КЛ
H	77 000 (9000)	—
He	11 500 (1000)	41 600 (2000)
C	465 (40)	270 (51)
N	20 (10)	80 (22)
O	525 (50)	625 (76)
Ne	62 (5)	83 (23)
Na	9 (3)	8,7 (3,2)
Mg	110 (7)	124 (25)
Al	14 (3)	9,4 (3,8)
Si	100	100
S	14 (3)	23 (12)
Ar	4 (2)	4,1 (2)
Ca	7 (2)	7,9 (39)
Fe	92 (12)	106 (39)
Ni	4,8 (0,6)	5,2 (2,6)

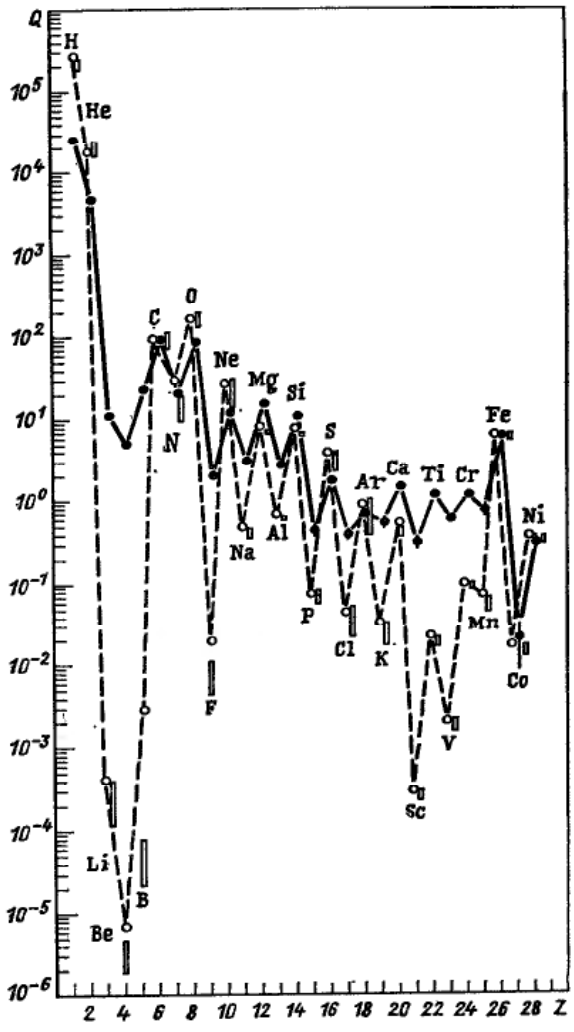


Рис. 43.5. Относительное содержание Q элементов от H до Ni; концентрация ядер C принята за 100 единиц: темные кружки — наблюдаемые у Земли КЛ с энергиями 70—280 МэВ/нуклон, светлые кружки — Солнечная система (в среднем); прямоугольники — локальная окрестность Галактики [17]

Для определения возраста КЛ в Галактике используется радиоактивный нуклид ^{10}Be. Доля нераспавшегося нуклида ^{10}Be составляет в КЛ 0,14±0,07 при энергии частиц $\varepsilon \approx 200$ МэВ/нуклон [22].

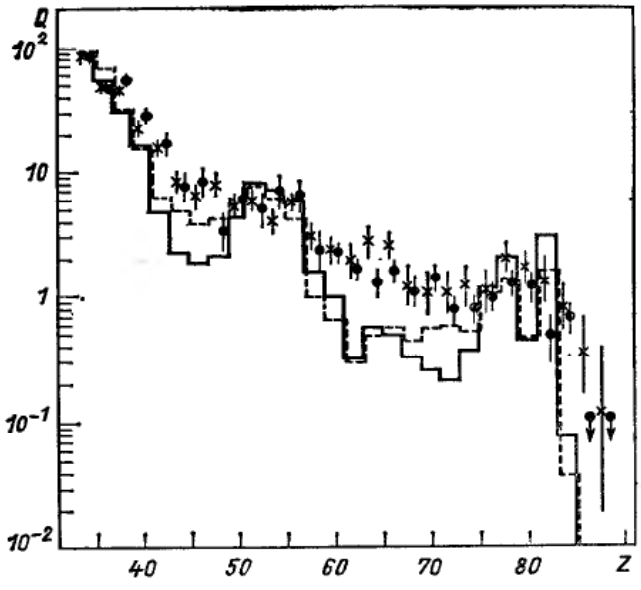


Рис. 43.6. Относительное содержание Q элементов с зарядом ядра $Z \geqslant 30$, нормированное на 10^6 (концентрация железа):

кружки и крестики — в составе КЛ; сплошная линия — в Солнечной системе; пунктир — ожидаемое содержание в том случае, если бы состав КЛ в источниках совпадал со средним составом вещества в Солнечной системе и средняя толща проходимого в межзвездной среде вещества составляла 55 кг/м² [18]

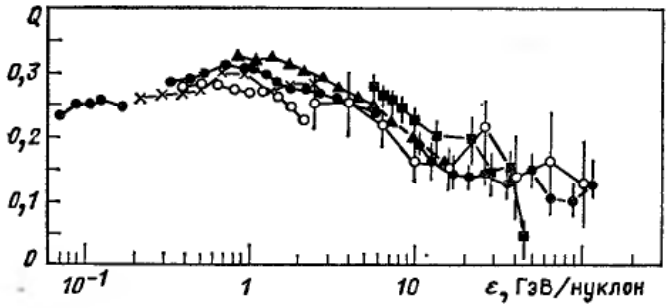


Рис. 43.7. Отношение потоков ядер B и C как функция энергии [19]

Отклонение углового распределения потока галактических КЛ от изотропного иллюстрирует рис. 43.8.

43.3. МОДУЛЯЦИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Наличие в межпланетном пространстве регулярных и случайных магнитных полей солнечного происхождения приводит к модуляции КЛ — пространственным и временным изменениям их интенсивности [24—26] (класс IIIа в табл. 43.2; рис. 43.9, 43.10, *а, б*).

Измерения на космических аппаратах до расстояний от Солнца более 30 а.е. (1 а.е=1,496·10^{11} м) обнаруживают в плоскости эклиптики радиальный градиент интенсивности галактических КЛ в межпланетной среде с типичными значениями $3 \cdot 10^{-2}$ (а.е.)$^{-1}$ в период мак-

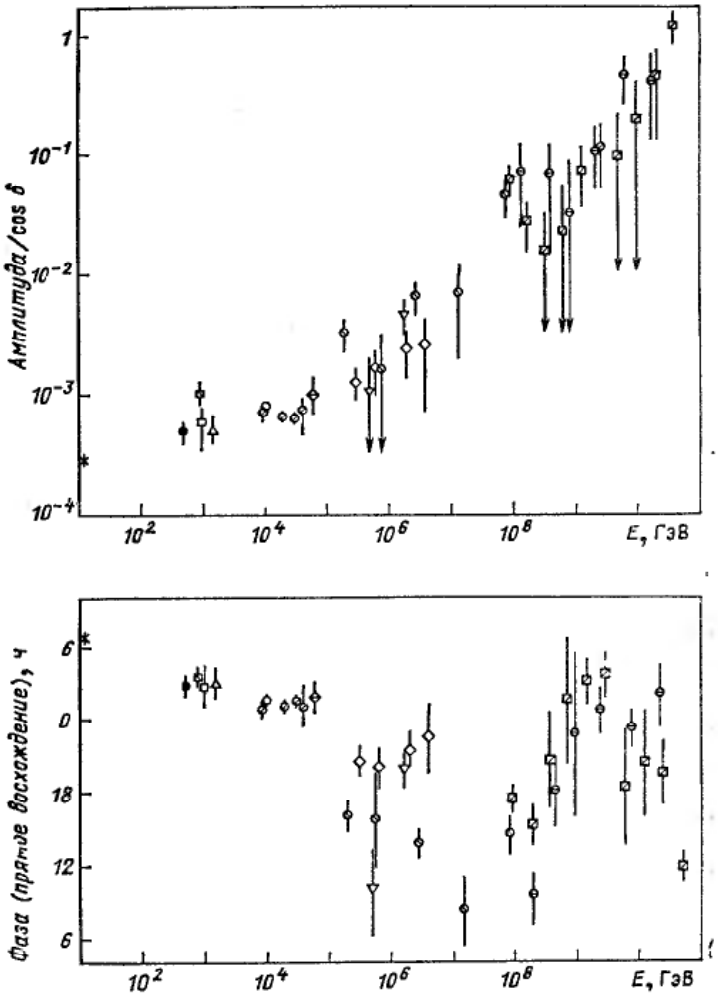


Рис. 43.8. Анизотропия КЛ, определенная с помощью гармонического анализа скорости счета детекторов КЛ по звездному времени. Приведены амплитуда и фаза первой гармоники (δ-географическая широта, на которой проводились соответствующие наблюдения) [23]

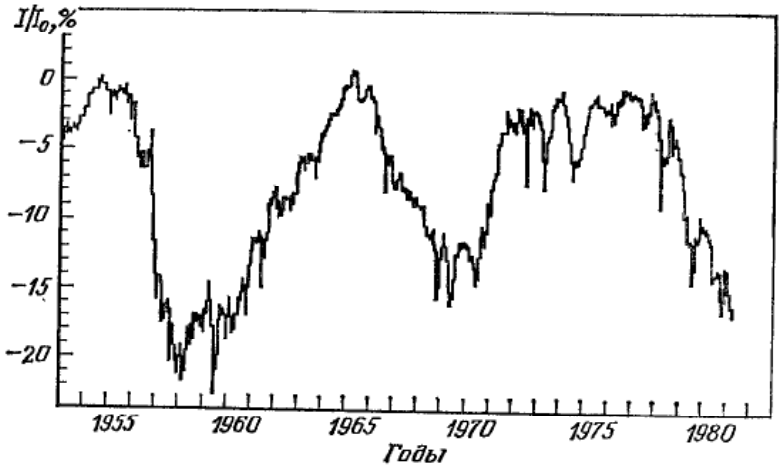


Рис. 43.9. Вариации относительной плотности потока ядерной компоненты галактических КЛ по усредненным за 27 дней показаниям нейтронного монитора станции Клаймакс (географическая широта 39,37°, долгота 253,82°). Средняя энергия первичных КЛ за пределами атмосферы примерно равна 6 ГэВ/нуклон. За нулевой уровень выбрана плотность потока в период минимума солнечной активности (1954 г.) [27]

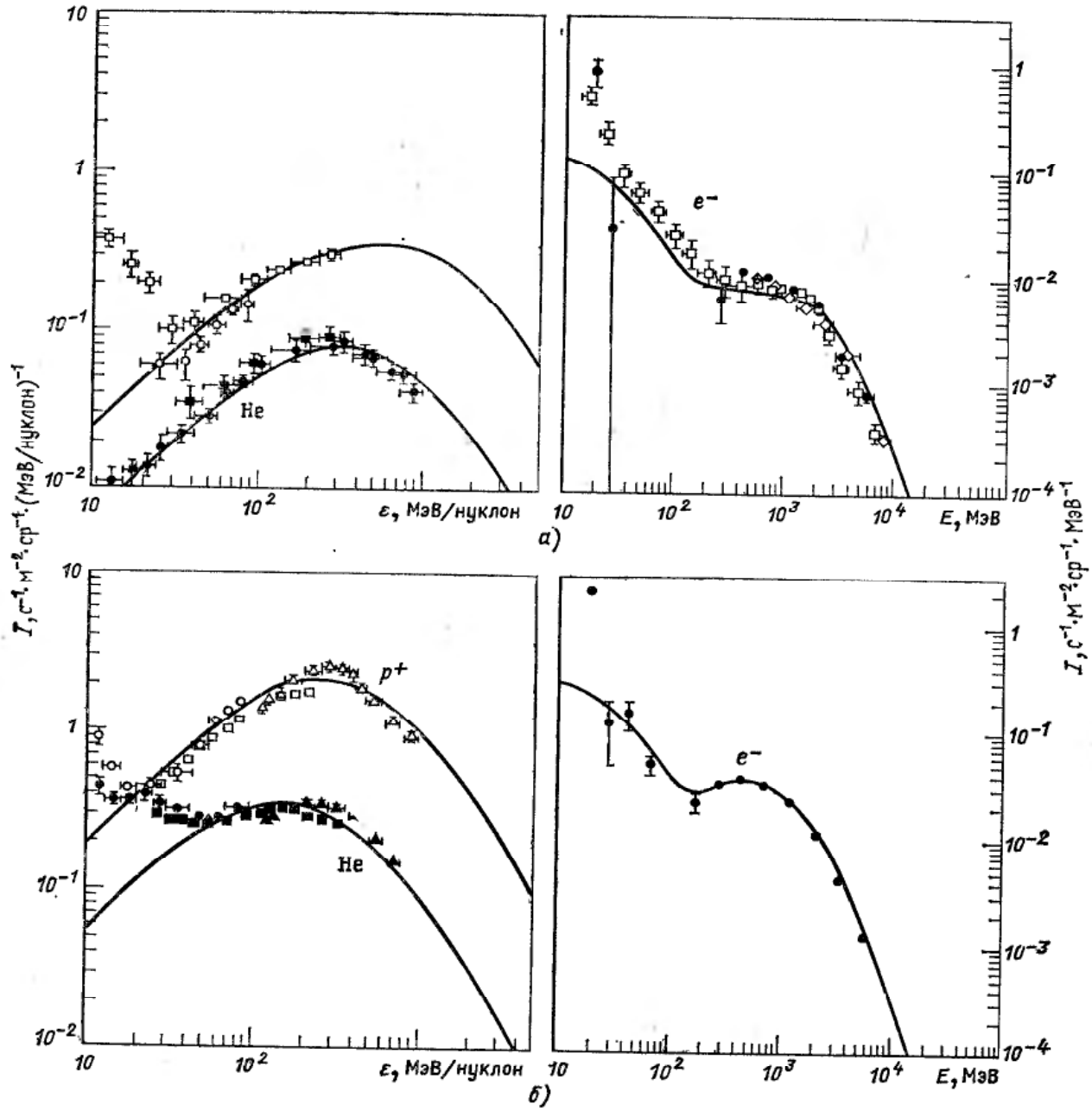


Рис. 43.10. Энергетические спектры КЛ в периоды максимума (*а*) — 1969 г. и минимума (*б*) — 1977 г. солнечной активности [28]

симума солнечной активности и $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ (а.е.)$^{-1}$ в минимуме солнечной активности (для $\varepsilon \approx 1$ ГэВ/нуклон) [27]. Понижение интенсивности КЛ во внутренних областях Солнечной системы обусловлено взаимодействием КЛ с неоднородностями магнитного поля, движущимися от Солнца вместе с солнечным ветром (потоком плазмы из атмосферы Солнца). Эффективный размер области модуляции галактических КЛ в межпланетной среде оценивается в 50—100 а.е. (в плоскости эклиптики).

43.4. СОЛНЕЧНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Основную долю солнечных КЛ составляют протоны. Для мощных солнечных вспышек отношение потоков протонов и ядер гелия примерно равно 50 при энергиях десятки мегаэлектрон-вольт на нуклон. Суммарная энергия ускоренных во вспышке частиц достигает 10^{25} Дж. Зарядовый состав ускоренных частиц, их полная энергия и вид энергетического спектра существенно изменяются от вспышки к вспышке. Дифференциальный спектр частиц по модулю импульса имеет степенной (с типичным показателем степени 3—7) или экспоненциальный вид. На орбите Земли поток солнечных КЛ обычно достигает максимального значения через 8—16 ч после начала вспышки и заметно уменьшается через 30—32 ч (см. подробнее [3, 26, 30]).

Вспышки КЛ, сопровождающиеся испусканием протонов с энергиями более 500 МэВ и дающие эффект на уровне земной поверхности, были зарегистрированы в течение 1942—1984 гг. примерно 40 раз. Эти вспышки происходят, как правило, в периоды изменения солнечной активности, но не в моменты ее максимума. Протонные вспышки с энергиями частиц $10 < E < 100$ МэВ регистрируются в верхних слоях атмосферы значительно чаще. Протонные вспышки на Солнце сопровождаются

Таблица 43.2. **Классификация временных вариаций плотности потока КЛ [24]**

Класс вариаций КЛ	Тип вариаций КЛ	$\delta I/I$, %			Природа вариаций
		Мезонная компонента	Нейтронная компонента	В стратосфере и за границей атмосферы	
I. Метеорологические	Сезонные	5	1	—	Изменение поглощения и распада вторичных частиц в земной атмосфере в связи с изменением метеорологических условий (температуры, давления) над пунктом наблюдения. Флуктуации атмосферных условий
	Суточные (маскируют аналогичные вариации III класса)	0,1—0,2%/К	—	—	
	Температурный эффект	0,1—0,2%/К	0,02%/К	—	
	Барометрический эффект	$(1 \div 3) \times 10^{-3}$%/Па	$7 \cdot 10^{-3}$%/Па		
II. Изменение геомагнитного порога обрезания КЛ	Возрастание в период главной фазы магнитной бури на фоне основного понижения	3	10	Непосредственное наблюдение изменения геомагнитного порога	Влияние вариаций токовых систем и магнитосферы на траектории КЛ и изменение геомагнитного порога обрезания КЛ
	Солнечно-суточные (локальный источник)	1	3		Асимметрия в изменении геомагнитного порога обрезания
IIIа. Модуляционные эффекты, связанные с деятельностью Солнца	11-летние 22-летние [29]	6	20	100	Рассеяние галактических КЛ на неоднородностях магнитного поля солнечного ветра. Изменения активности Солнца. Инверсия общего магнитного поля Солнца
	27-дневные	0,5	1—2	10	Асимметрия в потоке неоднородностей солнечного ветра и секторная структура межпланетного магнитного поля
	Со спорадическим периодом 7—35 суток	0.5	1—2	10	Анизотропия, вызываемая воздействием на КЛ электромагнитных полей в межпланетной среде
	Солнечно-суточные	0,2—0,3	0,5	2	
	Эффект Форбуша (понижение во время магнитной бури)	10	30	50	Взаимодействие КЛ с ударными волнами в межпланетной среде
	Возрастание перед эффектом Форбуша	1	2	—	Увеличение энергии КЛ, отражающихся от переднего фронта движущейся к Земле ударной волны
IIIб. Генерация быстрых частиц на Солнце	Большие возрастания интенсивности КЛ, связанные с мощными хромосферными вспышками на Солнце (значения приводятся для события 23.02.1956)	400	5000	В тысячи раз выше нормального уровня	Ускорение частиц в области солнечной вспышки с последующим распространением от Солнца
	Малые возрастания, связанные с обычными хромосферными вспышками	0,1—0,2	1	В десятки и сотни раз выше нормального уровня	
IIIв. Анизотропия и вариации интенсивности галактических КЛ	Возможные аномальные длительные возрастания потока КЛ (характерные времена 10^4—10^9 лет)	10^3—10^4		—	Вспышки сверхновых на расстоянии примерно 20 пк от Солнца
	Звездно-суточная вариация	0,1 (в минимуме солнечной активности)	—	—	Диффузия КЛ из Галактики, пекулярное движение Солнечной системы, потоки КЛ от отдельных близких галактических источников

испусканием быстрых электронов ($E>30$ кэВ, плотностью потока до 10^8 с$^{-1}\cdot$м$^{-2}\cdot$ср$^{-1}$).

Средняя по времени мощность КЛ от Солнца составляет 10^{17} Вт.

Связанные с генерацией быстрых частиц на Солнце вариации интенсивности КЛ у поверхности Земли указаны в табл. 43.2 (см. класс III б).

43.5. ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Действие земного магнитного поля приводит к изменению первоначальных траекторий КЛ [31]. В результате возникает эффект геомагнитного обрезания КЛ: для каждой геомагнитной широты Земли с данного направления могут приходить частицы с жесткостью R, превышающей пороговое значение (табл. 43.3). Значение жесткости R, В, определяет траекторию заряженной частицы в магнитном поле. Радиус, м, кругового движения заряженной частицы в однородном магнитном поле B, Тл, составляет $r=3{,}34\cdot10^{-9}\ R/B$.

Вариации интенсивности КЛ геомагнитной природы указаны в классе II табл. 43.2.

43.6. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Слой атмосферного воздуха для падающих из космоса быстрых частиц эквивалентен примерно 13 ядерным пробегам и 27 радиационным длинам, поэтому первичные КЛ достаточно высокой энергии вызывают разветвленную цепь взаимодействий. Возникающие при этом $\pi^{\pm}$-мезоны и частично K-мезоны при распаде порождают мюоны и нейтрино — так называемую проникающую компоненту вторичных КЛ. (Мюоны при энергиях менее

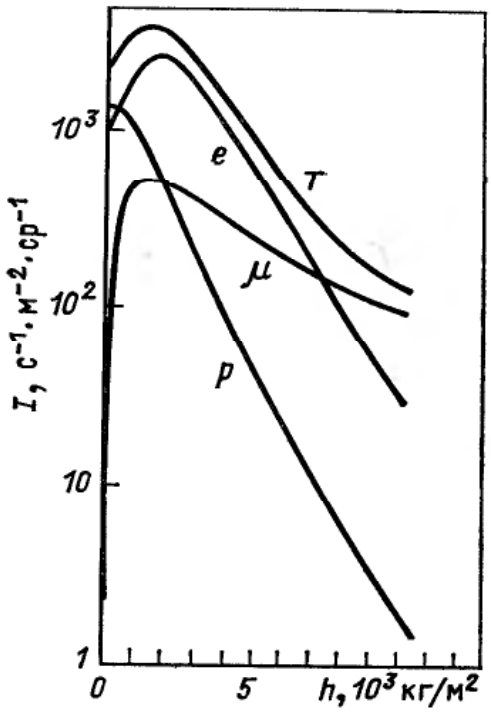


Рис. 43.11. Плотность потока КЛ по вертикали как функция глубины в атмосфере (г. Саскатун, географическая широта 60,5°, долгота 311,9°) в год минимума солнечной активности:
τ — полная интенсивность; e — электроны; μ — мюоны; p — протоны [35]

Таблица 43.3. **Значения порога обрезания, ГВ, для вертикальных направлений [32]**
(δ — геомагнитная широта, φ — геомагнитная долгота)

δ	φ, град											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
75	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
60	1,1	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	1,8	1,1	0,4	0,2	0,2	0,6
45	4,7	5,4	5,8	6,2	6,6	7,0	5,6	4,2	2,4	1,3	1,4	3,0
30	11,2	12,1	13,3	14,4	14,4	13,6	11,9	9,9	9,4	4,6	4,2	8,9
15	14,5	15,5	16,6	17,5	17,0	15,9	14,9	14,1	13,0	9,8	9,3	13,2
0	14,0	14,8	16,1	17,0	16,8	16,2	15,8	15,2	14,6	13,6	13,1	13,7
—15	11,0	11,5	12,4	13,0	13,4	13,7	14,2	14,4	14,2	13,7	13,0	12,3
—30	6,8	6,1	5,7	5,1	5,2	6,0	8,0	9,5	12,1	12,3	11,4	10,3
—45	3,7	2,7	2,1	1,4	1,1	1,6	2,8	4,3	5,9	9,3	8,6	6,5
—60	1,9	1,1	0,6	0,2	0,1	0,2	0,5	1,2	2,3	3,9	4,2	3,3
—75	0,6	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,6	0,9	1,2	1,0

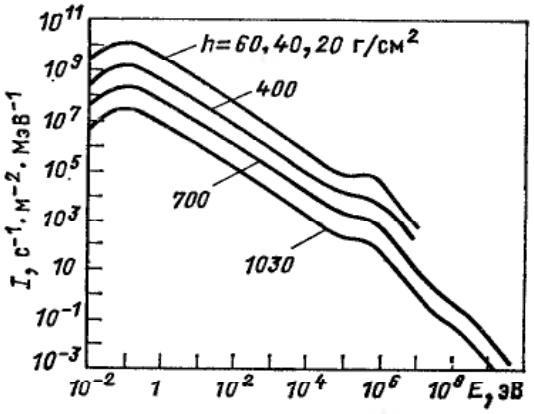


Рис. 43.12. Равновесная плотность потока нейтронов как функция энергии на различных глубинах в атмосфере на широте 44° [33]. Поток нейтронов у земной поверхности в области энергии 1—10^7 эВ претерпевает значительные флуктуации с изменением свойств почвы (например, при наличии или отсутствии влаги) и других трудно учитываемых локальных факторов

10^{12} эВ теряют энергию в основном на ионизацию вещества, их пробег примерно пропорционален энергии и достигает 1 км в грунте. Мюоны большей энергии поглощаются по экспоненциальному закону и проникают в грунт на глубину 3—5 км.) Не успевающие распасться пионы наряду с нуклонами продолжают каскад взаимодействий до энергий частиц порядка 10^9 эВ (так называемая ядерно-активная вторичная компонента КЛ). Распад $\pi^0 \longrightarrow 2\gamma$ приводит к образованию электронно-фотонного ливня — электронно-фотонной вторичной компоненты КЛ (фотоны выбивают атомные электроны и порождают пары e^+e^-, радиационное торможение и аннигиляция которых вновь приводят к образованию фотонов) [24. 33. 34] (табл. 43.4, рис. 43.11—43.13).

Таблица 43.4. **Диссипация энергии КЛ в атмосфере на геомагнитной широте 50°** [33]

Канал диссипации	Мощность, 10^{-8} Вт/(м²·ср)
Ионизация в атмосфере	120
Остаточная энергия на уровне моря	6
Ядерные расщепления	24
Нейтрино	37
Сумма	187

Ливни вторичных частиц в атмосфере Земли, порождаемые первичными КЛ с энергией более 10^{14} эВ, называются широкими атмосферными ливнями.

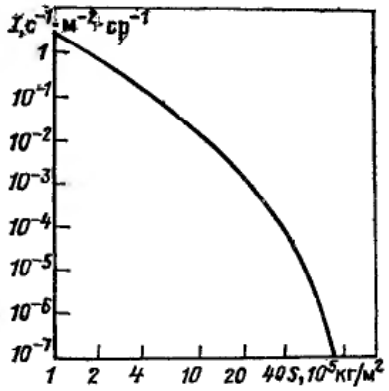


Рис. 43.13. Плотность потока мюонов на различных глубинах в зависимости от толщи S «стандартного грунта» (вещество со средней плотностью $2{,}65 \cdot 10^3$ кг/м³, средним отношением заряда ядра к атомному номеру $Z/A = 0{,}5$ и средним значением $Z^2/A = 5{,}5$) [36]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И.** Происхождение космических лучей. М.: Изд-во АН СССР, 1963.

2. **Астрофизика** космических лучей/В. С. Березинский, С. В. Буланов, В. Л. Гинзбург, В. А. Догель, В. С. Птускин; Под. ред. В. Л. Гинзбурга. М.: Наука, 1984.

3. **Дорман Л. И., Мирошниченко Л. И.** Солнечные космические лучи. М.: Наука, 1968.

4. **Eraker J. H.**//Astrophys. J. 1982. Vol. 257. P. 862—880.

5. **Garcia-Munoz M., Pyle K. R., Sympson J. A.**// //Astrophys. J. 1983. Vol. 274. P. L93—98.

6. **Аллен К. У.** Астрофизические величины: Пер. с англ./Под ред. Д. Я. Мартынова. М.: Мир, 1977.

7. **Webber W. R., Lezniak J. A.**//Astrophys. Space Sci. 1974. Vol. 30. P. 361—380.

8. **Linsley J.**//IAU Symp. N 94. Origin of Cosmic Rays/Ed. by G. Setti, G. Spada, A. Wolfendale. Dordrecht — Boston — Lond.: D. Reidel Publ. Comp. 1980. P. 53—68.

9. **Müller D., Tang J.**//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 2. P. 93—96.

10. **Nishimura J., Fujii M., Taira T. e. a.**//Astrophys. J. 1980. Vol. 238. P. 394—409.

11. **Tan L. C., Ng L. K.**//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 2. P. 202—205.

12. **Bogomolov E. A., Lubyanaya N. D., Romanov V. A. e. a.**//16th Intern. Cosmic Ray Conf. Kyoto. 1979. Vol. 1. P. 330—333.

13. **Golden R. L., Horan S., Maguer B. G. e. a.**// //Phys. Rev. Lett. 1979. Vol. 43. P. 1196—1199.

14. **Bogomolov E. A., Vasilyev G. I., Krutkov S. V. e. a.**//20th Intern. Cosmic. Ray Conf. Moscow. 1987. Vol. 2. P. 72—75.

15. **Sympson J. A.**//Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1983. Vol. 33. P. 323—381.

16. **Webber W. R.**//Astrophys. J. 1982. Vol. 255. P. 329—340.

17. **Meyer P.** See [8]. P. 7—22.

18. **Israel M. H.**//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 12. P. 53—68.

19. **Webber W. R.**//Composition and Origin of Cosmic Rays/Ed. by M. M. Shapiro. Dordrecht—Boston—Lond.: D. Reidel Publ. Comp. 1983. P. 25—45.

20. **Mewaldt R. A.**//Rev. Geophys. Space Phys. 1983. Vol. 21. P. 295—305.

21. **Meyer J.**//17th Intern. Cosmic Ray Conf. Paris. 1981. Vol. 3. P. 145—148.

22. **Garcia-Munoz M., Mazon G. M., Sympson J. A.**// //Astrophys. J. 1977. Vol. 217. P. 859—877.

23. **Linsley J.**//18th Intern. Cosmic Ray Conf. Bangalore, 1983. Vol. 13. P. 135—192.

24. **Дорман Л. И.** Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975.

25. **Космические** лучи и солнечный ветер/Г. Ф. Крымский, А. И. Кузьмин, П. А. Кривошапкин и др. Новосибирск: Наука, 1981.

26. **Топтыгин И. Н.** Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука. 1983.

27. **McKibben R. B., Pyle K. R., Sympson J. A.**// //Astrophys. J. 1982. Vol. 254. P. L23—27.

28. **Evenson P., Garcia-Munoz M., Meyer P.**//Astrophys. J. 1983. Vol. 275. P. L15—L18.

29. **Vernov S. I., Charakchyan A. N., Stozhkov Yu. I.**// //14 th Intern Cosmic Ray Conf. Munich. 1975. Vol. 3. P. 1015—1019.

30. **Мирошниченко Л. И., Петров В. М.** Динамика радиационных условий в космосе. М.: Энергоатомиздат, 1985.

31. **Дорман Л. И., Смирнов В. С., Тясто М. И.** Космические лучи в магнитном поле Земли. М.: Наука, 1971.

32. **Shee M. A., Smart D. F.**//J. Geophys. Res. 1967. Vol. 72. P. 2021—2027.

33. **Хаякава С.** Физика космических лучей: Пер. с англ./Под ред. И. П. Иваненко. М.: Мир. 1973. Ч. 4. 1: Ядерно-физический аспект.

34. **Hillas A. M.** Cosmic Ray. Oxford: Pergamon Press. 1972.

35. **Komori H.**//J. Phys. Soc. Jap. 1962. Vol. 17. P. 457—460.

36. **Мурзин В. С.** Физика космических лучей: М.: Изд-во МГУ, 1970.

ГЛАВА 44

ФИЗИКА ЗЕМЛИ

И. А. Маслов

44.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛИ

Фигура Земли

Под действительной фигурой Земли понимают фигуру ее физической поверхности, т. е. поверхности суши, океанов, морей, озер. В научных исследованиях и при решении практических задач для описания фигуры Земли используется поверхность геоида, т. е. поверхность уровня потенциала силы тяжести.

Наконец, для научного и практического использования принимается обобщенная, достаточно простая математическая аппроксимация — эллипсоид вращения, параметры которого подбирают из условия наилучшего соответствия фигуре геоида (более строго — квазигеоида).

В ряде случаев наряду с чисто геометрическим понятием земного эллипсоида используют понятие Нормальной Земли, масса которой равна массе реальной Земли, а поверхностью является эллипсоид вращения. В 1967 г. на съезде Международной ассоциации геодезии была принята модель Нормальной Земли [1]. В 1975 г. XVI Генеральной ассамблеей международной ассоциации геодезии были уточнены физические параметры «Нормальной Земли 1967 г.» [2]:

Геоцентрическая гравитационная постоянная GM, м^3·с$^{-2}$	$3\,986\,005\cdot10^8$
Геоцентрическая гравитационная постоянная атмосферы GM_a, м^3·с$^{-2}$	$35\cdot10^7$
Зональные гармонические коэффициенты разложения потенциала сила тяжести:	
I_2	$108\,263\cdot10^{-8}$
I_3	$254\cdot10^{-8}$
I_4	$161\cdot10^{-8}$
I_5	$23\cdot10^{-8}$
I_6	$54\cdot10^{-8}$
Экваториальный радиус Земли a_e, м	6 378 140
Ускорение свободного падения на экваторе g, м·с$^{-2}$	$978\,032\cdot10^{-5}$
Обратное сжатие f^{-1}	$298\,257\cdot10^{-3}$
Потенциал силы тяжести на геоиде W_0, м^2·с$^{-2}$	$6\,263\,683\cdot10$
Геопотенциальный масштабный коэффициент $R_0=GM/W_0$, м	6 363 676

В СССР в 1946 г. в качестве фигуры Земли принят эллипсоид Красовского с параметрами [3]:

Экваториальный радиус a, м	6 378 245
Полярный радиус b, м	6 356 863
Обратное сжатие f^{-1}	298,3
Площадь поверхности эллипсоида, км^2	$5,10\cdot10^8$
Объем эллипсоида, км^3	$1,083\cdot10^{12}$
Средний радиус равновеликой сферы R, м	6 371 110
Средняя плотность Земли ρ, г/см^3	5,517
Масса Земли, имеющей среднюю плотность M, г	$5,975\cdot10^{27}$

Зависимость между приращениями геодезической широты dB и долготы $dL\cos B$ и приращениями длин дуг меридиана dx и параллели dy для эллипсоида Красовского имеет вид [3]

$dL\cos B$, dB	1″	1′	1°
dx, dy	30,9 м	1,85 км	111 км
dx, dy	100 м	1 км	100 км
$dL\cos B$, dB	3,23″	32″	54′

Строение Земли

Форма Земли, близкая к эллипсоиду вращении, указывает на то, что вещество Земли находнтся в гидростатическом равновесии по отношению к действующим на него силам (притяжения и центробежным), т. е. Земля ведет себя по отношению к длительно действующим силам как жидкое тело [4, 5]. По оценкам вязкость Земли равна 10^{22} Па·с.

В то же время модуль сдвига, определенный для Земли в целом по кратковременным воздействиям (землетрясения, приливы и перемещения масс в атмосфере и др.) составляет около $15\cdot10^{10}$ Н·м$^{-2}$. Таким образом, земной шар является вязкоупругим телом с периодом релаксации $\tau\approx10^{10}$ с.

Упругие свойства внутри Земли изменяются на некоторых определенных значениях глубин скачком и плавно в пределах слоев, разделенных этими границами. Важнейшими границами являются поверхность Мохоровичича, залегающая на глубине 10—70 км, и поверхность Вихерта — Гутенберга на глубине 2900 км, резко преломляющая продольные упругие волны и не пропускающая поперечных волн. Эти границы разделяют земной шар на три главные зоны: кору, мантию и ядро. Кора обладает наибольшей жесткостью, мантия характеризуется высокой вязкостью, а ядро находится в состоянии, близком к жидкому, и реагирует лишь на продольные волны изменением объема. Внутри трех главных зои земного шара имеются менее четко выраженные границы. Масса литосферы составляет основную часть массы оболочек Земли [5]:

атмосфера	океан	кора	мантия	ядро
$0,854\cdot10^{-6}$	$0,23\cdot10^{-3}$	$0,435\cdot10^{-2}$	0,6697	0,3259

Внутреннее строение Земли оценивается по известной массе, моменту инерции земного шара и на основе изучения упругих волн от землетрясений. Получено, что плотность вещества в центре Земли $\rho_д\geqslant12,2$ г/см^3 и ядро Земли отделено на глубине 2900 км от лежащих выше слоев резким скачком плотности, порядка 4 г/см^3. Скачкообразные изменения плотности с глубиной могут быть вызваны изменением как состава пород, так и их фазового состояния [6]. Кора континентов в 3—10 раз толще коры океана. Толщина коры континентов различна на платформах (30—40 км) и в геосинклиналях (40—80 км). В зонах самых высоких гор Памира и Гималаев она достигает 70—80 км. Нижняя граница коры — граница Мохоровичича M — в этих областях образует корни гор, которые глубоко (на 30—40 км) по сравнению с платформенными равнинными районами внедряются в мантию. Кора океанов — тонкая, около 4—8 км. Граница M залегает здесь на глубине 10—15 км. Разность глубин границы M на континентах и в океанах составляет 20—50 км. Средняя плотность коры на континентах 2,7—2,8 г/см^3, под океанами 2,9 г/см^3. Плотность верхней мантии 3,3—3,4 г/см^3. На континентах поверхность мантии образует впадины, в океанах — огромные выступы. Земная кора континентов и океанов различается по значениям скорости распространения упругих волн. Кора океанов не содержит слоев со скоростью распространения продольных волн 6 км/с, характерных для коры континентов.

В земной коре различают два главных слоя: осадочный, состоящий из пород, залегающих почти гори-

зонтально, и консолидированный, или кристаллический. Скорости распространения упругих волн в осадочных породах имеют широкие пределы, но в толстых слоях обычно не превышают 5 км/с. В консолидированной части коры скорость распространения упругих волн выше 6 км/с (на континентах в верхней части консолидированной коры близка к 6 км/с, в нижней — к 7 км/с; в океанах 6,5 — 7 км/с).

Внутреннее строение Земли описывается моделями, характеризующими изменения с возрастанием глубины плотности, давления, ускорения свободного падения, скорости сейсмических волн и других параметров. Классические модели сферически-симметричны.

Принято учитывать различия глубинного строения Земли путем построения моделей Земли океанического и континентального типов и средней модели Земли, являющейся их комбинацией (табл. 44.1).

Таблица 44.1. **Физические параметры моделей Земли [7]**

Радиус, км	Глубина, км	Плотность, г/см$^{-3}$	Скорость продольных волн, км/с$^{-1}$	Скорость поперечных волн, км/с$^{-1}$	Модуль сжатия, 10^8 Па	Модуль сдвига, 10^8 Па	Давление, 10^8 Па	Ускорение свободного падения, см/с^2
0	6371,0	13,012	11,241	3,565	14 237	1653	3632,4	0
1217,1	5153,9	12,704	11,091	3,439	13 625	1502	3288,7	436,2
1217,1	5153,9	12,139	10,258	0,000	12 773	0	3288,7	436,2
3485,7	2885,3	9,909	8,002	0,000	6 345	0	1354,0	1069,3
3485,7	2885,3	5,550	13,732	7,243	6 582	2911	*1354,0*	*1069,3*
5701,0	670,0	5,377	10,928	6,114	3 045	1639	239,1	1001,2
5701,0	670,0	4,077	10,038	5,417	2 480	1220	239,1	1001,2
5951,0	420,0	3,768	9,554	5,052	2 157	961	141,1	997,6
			Океаническая Земля					
5951,0	420,0	3,553	8,949	4,789	1 758	815	141,1	997,6
6360,0	11,0	3,305	7,900	4,550	1 150	684	2,2	983,5
6360,0	11,0	2,850	6,400	3,700	647	390	2,2	983,5
6366,0	5,0	2,850	6,400	3,700	647	390	0,6	983,0
6366,0	5,0	1,500	2,000	1,000	40	15	0,6	983,0
6367,0	4,0	1,500	2,000	1,000	40	15	0,4	982,9
6367,0	4,0	1,030	1,500	0,000	23	0	0,4	982,9
6371,0	0,0	1,030	1,500	0,000	23	0	0	982,0
			Континентальная Земля					
5951,0	420,0	3,553	9,135	4,816	1865	823	140,7	997,6
6336,0	35,0	3,320	8,020	4,690	1161	730	9,7	984,2
6336,0	35,0	2,920	6,500	3,750	686	410	9,7	984,2
6351,0	20,0	2,320	6,500	3,750	686	410	5,3	983,3
6351,0	20,0	2,720	5,800	3,450	483	323	5,3	983,3
6371,0	0,0	2,720	5,800	3,450	483	323	0,0	981,6
			Средняя Земля					
5951,0	420,0	3,553	8,967	4,806	1762	820	141,1	997,6
6352,0	19,0	3,310	7,934	4,654	1127	716	4,8	983,7
6352,0	19,0	2,902	6,500	3,750	681	408	4,8	983,7
6357,0	14,0	2,902	6,500	3,750	681	408	3,3	983,4
6357,0	14,0	2,802	6,000	3,550	537	353	3,3	983,4
6368,0	3,0	2,802	6,000	3,550	537	353	0,3	982,6
6368,0	3,0	1,030	1,500	0,000	23	0	0,3	982,6
6371,0	0,0	1,030	1,500	0,000	23	0	0,0	981,9

44.2. ЛИТОСФЕРА

Состав и свойства (табл. 44.2—44.4)

Литосфера состоит из осадочных и кристаллических пород. В пределах литосферы различают два резко различных региона [8]: глубинную океаническую область (площадь 268 млн. км^2, средняя глубина ниже уровня моря 4,5 км, мощность слоя 6 км) и область континентального щита (105 млн. км^2, средняя высота над уровнем моря 0,75 км, мощность слоя 35,05 км). Различают две переходные области: область молодых складчатых поясов (42 млн. км^2) и субокеаническую область (93 млн. км^2). Площадь 2 млн. км^2 суши в основном представляет собой вулканические острова.

Поле силы тяжести

Поле силы тяжести на поверхности Земли определяется потенциалом и его первыми и вторыми производными [12]. Приведем эти величины в прямоугольной системе координат с направлениями осей: x — на север, y — на восток, z — вниз по направлению отвесной линии. Потенциал W является суммой потенциалов притяжения земных масс (гравитационного потенциала) и центробежных сил, возникающих при вращении Земли (центробежного потенциала), и выражается в джоулях.

Для его первой производной (ускорения свободного падения) $g_z = dW/dz$ (табл. 44.5) и вторых производных (W_{xx}, W_{yx}, ...) введены специальные наимено-

Таблица 44.2. **Средний химический состав литосферы [6]**

Соединение	Масса, 10^{18} кг	Содержание, %	Соединение	Масса, 10^{18} кг	Содержание, %
SiO_2	13 050	55,2	Fe_2O_3	661	2,8
Al_2O_3	3 629	15,3	K_2O	452	1,9
CaO	2 082	8,8	TiO_2	385	1,6
FeO	1 381	5,8	P_2O_5	62,0	0,3
MgO	1 234	5,2	MnO	42,6	0,2
Na_2O	682	2,9			

Таблица 44.3. **Осиовные физические свойства горных пород [9]**

Свойство	Пределы значений для горных пород	
	магматических и метаморфических	осадочных
Плотность, г/см³	2,5—3,3	1,9—2,9
Пористость, %	До 10	До 40
Магнитная восприимчивость, 10^{-9} м³/кг	100—4000	До 600
Остаточное намагничивание, 10^{-3} А/м	До 320	—
Модуль Юнга, 10^{11} г/см²	5—30	2,5—12
Коэффициент Пуассона	0,21—0,28	0,23—0,27
Скорость распространения продольных колебаний, км/с	4,9—10,1	0,5—5,9
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	400—100 000	0,3—5000
Теплопроводность, Вт/(см·К)	0,001—0,03	0,01—0,03
Удельная теплоемкость, Дж/(г·К)	0,5—1,17	0,67—0,96

Таблица 44.4. **Распространенность химических элемеитов в земной коре [10, 11]**

Атомный номер	Элемент	Массовое содержание, %
1	Водород	1,00
2	Гелий	10^{-6}
3	Литий	$5\cdot10^{-3}$
4	Бериллий	$4\cdot10^{-4}$
5	Бор	$5\cdot10^{-3}$
6	Углерод	0,35
7	Азот	0,04
8	Кислород	49,13
9	Фтор	0,08
10	Неон	$5\cdot10^{-7}$
11	Натрий	2,40
12	Магний	2,35
13	Алюминий	7,45
14	Кремний	26,00
15	Фосфор	0,12
16	Сера	0,10
17	Хлор	0,20

Продолжение табл. 44.4

Атомный номер	Элемент	Массовое содержание, %
18	Аргон	$4\cdot10^{-4}$
19	Калий	2,35
20	Кальций	3,25
21	Скандий	$6\cdot10^{-4}$
22	Титан	0,61
23	Ванадий	0,02
24	Хром	0,03
25	Марганец	0,10
26	Железо	4,20
27	Кобальт	$2\cdot10^{-3}$
28	Никель	0,02
29	Медь	0,01
30	Цинк	0,02
31	Галлий	10^{-4}
32	Германий	$4\cdot10^{-4}$
33	Мышьяк	$5\cdot10^{-4}$
34	Селен	$8\cdot10^{-5}$
35	Бром	10^{-3}
36	Криптон	$2\cdot10^{-8}$
37	Рубидий	$8\cdot10^{-3}$
38	Стронций	0,035
39	Иттрий	$5\cdot10^{-3}$
40	Цирконий	0,025
41	Ниобий	$3{,}2\cdot10^{-5}$
42	Молибден	10^{-3}
44	Рутений	$5\cdot10^{-6}$
45	Родий	10^{-6}
46	Палладий	$5\cdot10^{-6}$
47	Серебро	$5\cdot10^{-6}$
48	Кадмий	$5\cdot10^{-4}$
49	Индий	10^{-5}
50	Олово	$8\cdot10^{-3}$
51	Сурьма	$5\cdot10^{-5}$
52	Теллур	10^{-6}
53	Иод	10^{-4}
54	Ксенон	$3\cdot10^{-9}$
55	Цезий	10^{-3}
56	Барий	0,05
57	Лантан	$6{,}5\cdot10^{-4}$
58	Церий	$2{,}9\cdot10^{-3}$
59	Празеодим	$4{,}5\cdot10^{-4}$
60	Неодим	$1{,}7\cdot10^{-3}$
62	Самарий	$7\cdot10^{-4}$
63	Европий	$2\cdot10^{-5}$
64	Гадолиний	$7{,}5\cdot10^{-4}$
65	Тербий	10^{-4}
66	Диспрозий	$7{,}5\cdot10^{-4}$
67	Гольмий	10^{-4}
68	Эрбий	$6{,}5\cdot10^{-4}$
69	Тулий	10^{-4}
70	Иттербий	$8\cdot10^{-4}$
71	Лютеций	$1{,}7\cdot10^{-4}$
72	Гафний	$4\cdot10^{-4}$
73	Тантал	$2{,}4\cdot10^{-5}$
74	Вольфрам	$7\cdot10^{-3}$
75	Рений	10^{-7}
76	Осмий	$5\cdot10^{-6}$
77	Иридий	10^{-6}
78	Платина	$2\cdot10^{-5}$
79	Золото	$5\cdot10^{-7}$
80	Ртуть	$5\cdot10^{-6}$
81	Таллий	10^{-5}
82	Свинец	$1{,}6\cdot10^{-3}$
83	Висмут	10^{-5}
90	Торий	10^{-3}
92	Уран	$4\cdot10^{-4}$

вания единиц: для g — 1 гал=1 см/с² и для вторых производных — этвеш, обозначается буквой E: 1 этвеш=E=10^{-9} с².

Таблица 44.5 **Зависимость ускорения свободного падения g, см·с$^{-2}$, от широты места φ, град, на поверхности эллипсоида Красовского [12]**

φ	g	φ	g	φ	g
0	978,0300	30	979,3212	60	981,9140
5	978,0692	35	979,7299	65	982,2853
10	978,1856	40	980,1659	70	982,6061
15	978,3757	45	980,6159	75	982,8664
20	978,6338	50	981,0663	80	983,0584
25	978,9521	55	981,5034	85	983,1759
				90	983,2155

Значения вторых производных потенциала силы тяжести на поверхности эллипсоида Красовского выражаются формулами, 10^{-9} с²:

$$W_{yy} - W_{xx} \equiv W_{\Delta} = 5{,}1\,(1 + \cos 2\varphi);\ W_{xy} = 0;$$

$$W_{yz} = 0;\ W_{xz} = 8{,}1 \sin 2\varphi;\ W_{zz} =$$

$$= -3086\,(1 + 0{,}00071 \cos 2\varphi).$$

Периодические изменения g [12] на поверхности Земли, обусловленные влиянием Луны, составляют до $2{,}49 \cdot 10^{-4}$ см/с². Амплитуда солнечного приливного действия составляет $9{,}6 \cdot 10^{-5}$ см/с², так что суммарное влияние Луны и Солнца на g достигает $3{,}45 \cdot 10^{-4}$ см/с². Амплитуда приливных изменений g зависит от широты места наблюдения.

Сейсмичность [13]

Землетрясения — колебания Земли, вызываемые прохождением сейсмических волн из какого-либо источника сейсмической энергии. **Интенсивность (сила) землетрясения** определяется по степени разрушения зданий, характеру изменения земной поверхности и по данным об испытанных людьми ощущениях (табл. 44.6, 44.7) **Магнитуда землетрясения** (табл. 44.8) — показатель энергии очага, выражается в виде десятичного логарифма амплитуды наибольшего колебания грунта, записанного при прохождении сейсмической волны того или иного типа с внесением поправок, выражающих средние эмпирические зависимости интенсивности для коровых землетрясений от эпицентрального расстояния, а для подкоровых — еще и от глубины очага. Наиболее употребительны три шкалы магнитуд: рихтеровская (или локальная) M_L; определяемая по объемным продольным волнам m или m_b; определяемая по поверхностным волнам M_S. Между шкалами существуют некоторые различия, зависящие от энергии землетрясения. Зависимость между энергией упругих волн, Дж, и магнитудой может быть задана уравнением типа

$$\log E_0 = 5{,}24 + 1{,}44\, M_S\ .$$

Для определения магнитуды достаточно знания эмпирических зависимостей, характеризующих строение и свойства Земли на пути распространения волн, а для установления сейсмической энергии в очаге необходимо их детальное знание. Поэтому магнитуда как показатель интенсивности землетрясения в очаге в последние десятилетия стала преобладающей характеристикой.

Упругие волны в Земле [15]. Распространение упругих деформаций при землетрясениях носит волновой характер. Обычно исследуются продольные *(P)* и поперечные *(S)* объемные волны, а также поверхностные — волны Рэлея *(R)*, у которых колебание частиц происходит в плоскости, перпендикулярной поверхности и проходящей через направление сейсмического луча, и поперечные поверхностные волны Лява *(L)*.

Скорость сейсмических волн возрастает с увеличением глубины (табл. 44.1).

Микросейсмические колебания [16, 17]. Планетарные микроскопические колебания поверхности Земли — микросейсмы первого рода — регистрируются в диапазоне частот от 0,03 до 100 Гц в зависимости от места,

Таблица 44.6. **Шкала землетрясений [14, 15]**

Балл	Наименование	Смещение, мм	Ускорение, мм/с	Характеристика
1	Незаметное	—	2,5	Колебания почвы отмечаются приборами (микросейсмы)
2	Очень слабое	—	2,5—5,0	Изредка ощущаются людьми
3	Слабое	—	5—10	Отмечаются немногими людьми
4	Умеренное	0,5	10—15	Отмечаются многими людьми. Возможно колебание окон, дверей
5	Довольно сильное	0,5—1	25—230	Качания висящих предметов, скрип полов, осыпание побелки
6	Сильное	1,1—2	50—100	Легкие повреждения в зданиях, тонкие трещины в штукатурке, трещины в печах и т. д.
7	Очень сильное	2,1—4	100—250	Значительные повреждения в зданиях; откалывание отдельных кусков штукатурки, тонкие трещины в стенах
8	Разрушительное	4,1—8	250—500	Разрушения в зданиях: большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб
9	Опустошительное	8,1—16	500—1000	В некоторых зданиях обвалы: падение стен, перекрытий, кровли
10	Уничтожающее	16,1—32	1000—2500	Обвалы во многих зданиях, трещины в грунте около метра шириной
11	Катастрофическое	32	2500—5000	Многочисленные трещины на поверхности Земли, большие обвалы в горах
12	Сильная катастрофа	—	> 5000	Изменение рельефа в больших размерах

Таблица 44.7. **Статистика землетрясений за 1918—1964 гг. [15]**

Магнитуда	Число толчков за 10 лет	Энергия за 10 лет, Дж
8,5—8,9	3	$156 \cdot 10^{16}$
8,0—8,4	11	$113 \cdot 10^{16}$
7,5—7,9	31	$80 \cdot 10^{16}$
7,0—7,4	149	$58 \cdot 10^{16}$
6,5—6,9	560	$41 \cdot 10^{16}$
6,4—6,8	2100	$30 \cdot 10^{16}$

Таблица 44.8. **Энергия и магнитуда некоторых источников землетрясений [15]**

m	Энергия, Дж	Примечание
0	$1{,}7 \cdot 10^5$	Для очень слабых толчков данные ненадежны
1	$4{,}8 \cdot 10^6$	
2	$1{,}3 \cdot 10^8$	
2,5	—	Самые слабые из ощутимых землетрясений
3	$3{,}6 \cdot 10^9$	
4	$1{,}0 \cdot 10^{11}$	
5	$2{,}7 \cdot 10^{12}$	Самые слабые, вызывающие повреждения зданий
6,0	$4{,}4 \cdot 10^{13}$	Землетрясение в Скопле, 1963 г.
7,0	$2{,}1 \cdot 10^{15}$	Землетрясение в Инаигахуа, 1968 г.
7,8	—	Буллеровское землетрясение, 1929 г.
7,9	—	Землетрясение в Хокс-Бей, 1931 г.
8,3	—	Землетрясение в Сан-Франциско, 1906 г.
8,4	—	Чили, 1960 г., Аляска, 1964 г.
8,9	—	Самые сильные зарегистрированные сейсмические толчки: Колумбия, 1906 г., Санрикю, 1933 г.

условий наблюдения и частоты; они достигают 10 мкм для низкочастотных колебаний и уменьшаются до 10^{-3} мкм в очень тихих районах для частоты $\sim$ 1 Гц.

Микросейсмы второго рода вызваны поверхностными источниками (транспорт, промышленные предприятия, прибой и др.); они имеют периоды от 0,001 до 0,1 с, зависят от грунтовых условий и быстро убывают с удалением от источника. Амплитуды смещений лежат в диапазоне $\sim 10^{-4}$—$5 \cdot 10^{-2}$ мкм.

Магнитное поле

Магнитное поле Земли характеризуется вектором напряженности T. Проекции вектора T на оси прямоугольной системы координат образуют составляющие геомагнитного поля: Z — вертикальную, X — северную, Y — восточную. Часто применяется также горизонтальная составляющая $\sqrt{X^2+Y^2}$.

Угол между горизонтальным направлением H и географическим меридианом называется склонением D, а угол, образуемый вектором напряженности с горизонтальной плоскостью, — наклонением I.

Постоянное магнитное поле [18, 19]. Географическое распределение постоянного магнитного поля соответствует полю однородно намагниченной сферы с координатами полюсов: Северного (в Южном полушарии) $\varphi = 71{,}2°$, $\lambda = 150{,}8°$ и южного (в Северном полушарии) $\varphi = 70{,}5°$, $\lambda = 264°$. Линия, соединяющая магнитные полюсы, наклонена относительно географической оси на 11,5° и смещена от центра Земли на 1140 км в сторону Тихого океана. Напряженность магнитного поля на магнитном полюсе 19,5 А/м (0,65 Э), напряженность магнитного поля на магнитном экваторе 10,5 А/м (0,35 Э).

Параметры постоянного магнитного поля Земли изменяются на ее поверхности в следующих пределах:

T	H
От +18,6 до 21,8 А/м (от +0,62 до —0,73Э)	От 0 до ±12,3 А/м (от 0 до +0,41 Э)
Z	D / I
От +18,6 до —21,8 А/м (от +0,62 до —0,73 Э)	От —180° до +180° / От —90° до +90°

Общими чертами магнитного поля материков и океанов являются [19]:

крупноблоковая структура аномального магнитного поля с размерами участков различного характера поля от нескольких сотен километров и более;

наличие минимума в спектре аномального поля от 400 до 4000 км;

наличие областей с отчетливой анизотропией поля. Значения аномалий магнитного поля континентов вблизи поверхности колеблются в пределах от нескольких десятых долей ампера на метр до нескольких амперов на метр и более вблизи выходов фундаментов платформ на поверхность.

Географическое распределение постоянного магнитного поля Земли с учетом магнитных аномалий площадью от нескольких километров до целых материков изображается в виде карт, относящихся к определенной эпохе. Карты составляющих напряженности магнитного поля приведены на рис. 44.1—44.5 [19].

Вековые вариации геомагнитного поля. Средние значения элементов геомагнитного поля изменяются со временем. Сравнение элементов поля для 1885 и 1950 гг. приводит к выводу, что полный магнитный момент Земли уменьшается в течение года приблизительно на $7 \cdot 10^{-4}$. Следовательно, короткий, в геологическом отношении отрезок времени достаточен, чтобы полностью изменить всю картину геомагнитного поля.

Переменное магнитное поле Земли. Периодические вариации [20]. Все периодические вариации магнитного поля Земли имеют источник вне Земли. Вариации классифицируют по длине периода, что является одновременно классификацией по физическим причинам. Выделяются солнечно-суточные вариации, вызванные суточным движением Земли вокруг Солнца, лунно-суточные, годовые, циклические с периодом 11 лет, связанные с изменением солнечной активности, и др. Амплитуды всех периодических вариаций, кроме солнечно-суточных, составляют единицы угловых минут склонения и тысячные доли А/м напряженности поля (табл. 44.9).

Непериодические вариации магнитного поля Земли. Магнитные бури. Магнитные бури и общая магнитная активность вызываются взаимодействием корпускулярного излучения Солнца с постоянным магнитным полем Земли. Магнитные бури — резкие, неправильной формы колебания магнитного поля Земли — начинаются одновременно на всем магнитном земном шаре и имеют тенденцию к повторению через 27 суток. Поле изменяется по значению и направлению на несколько процентов за время от нескольких часов до нескольких суток.

Земные теллурические токи [21, 22]. Токи и переменное магнитное поле — явления, связанные между

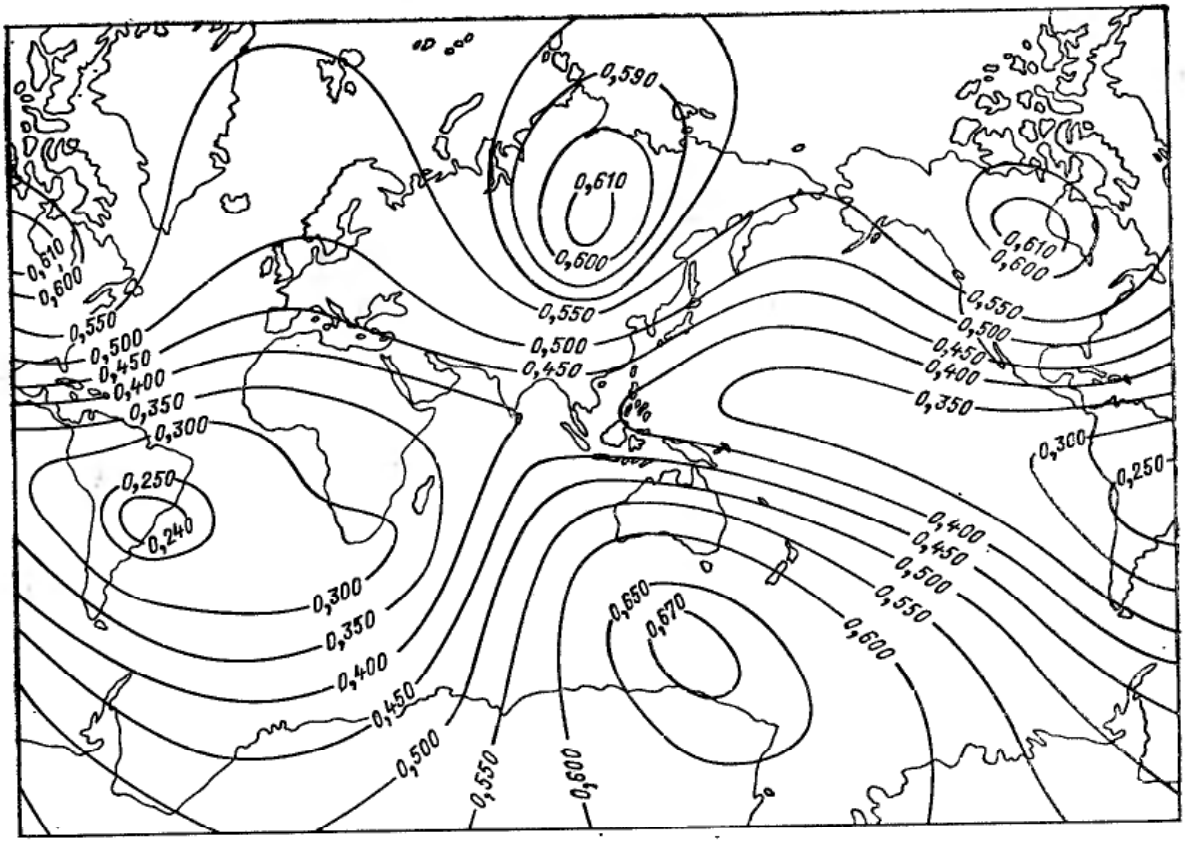


Рис. 44.1. Карта напряженности нормального геомагнитного поля $T_н$, 10^{-4} Тл, эпоха 1980 г. [19]

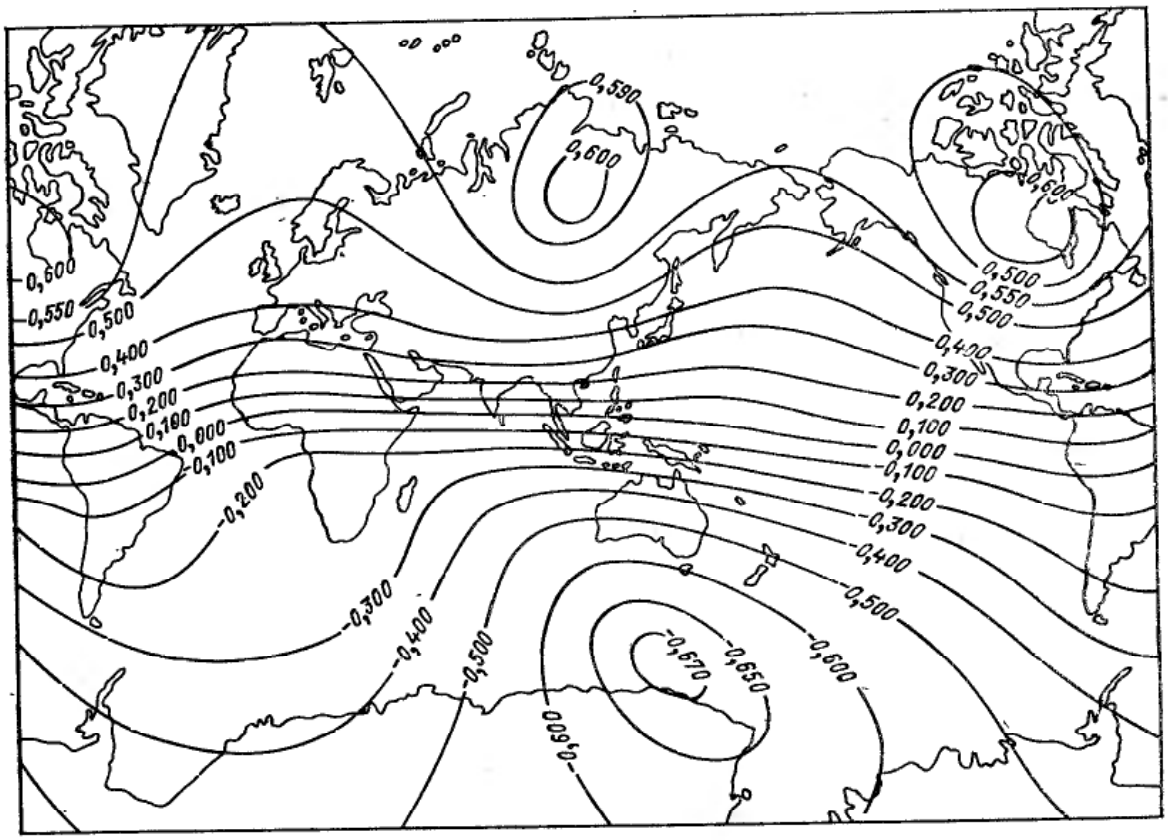


Рис. 44.2. Карта вертикальной составляющей $Z_н$ нормального геомагнитного поля, 10^{-4} Тл, эпоха 1980 г. [19]

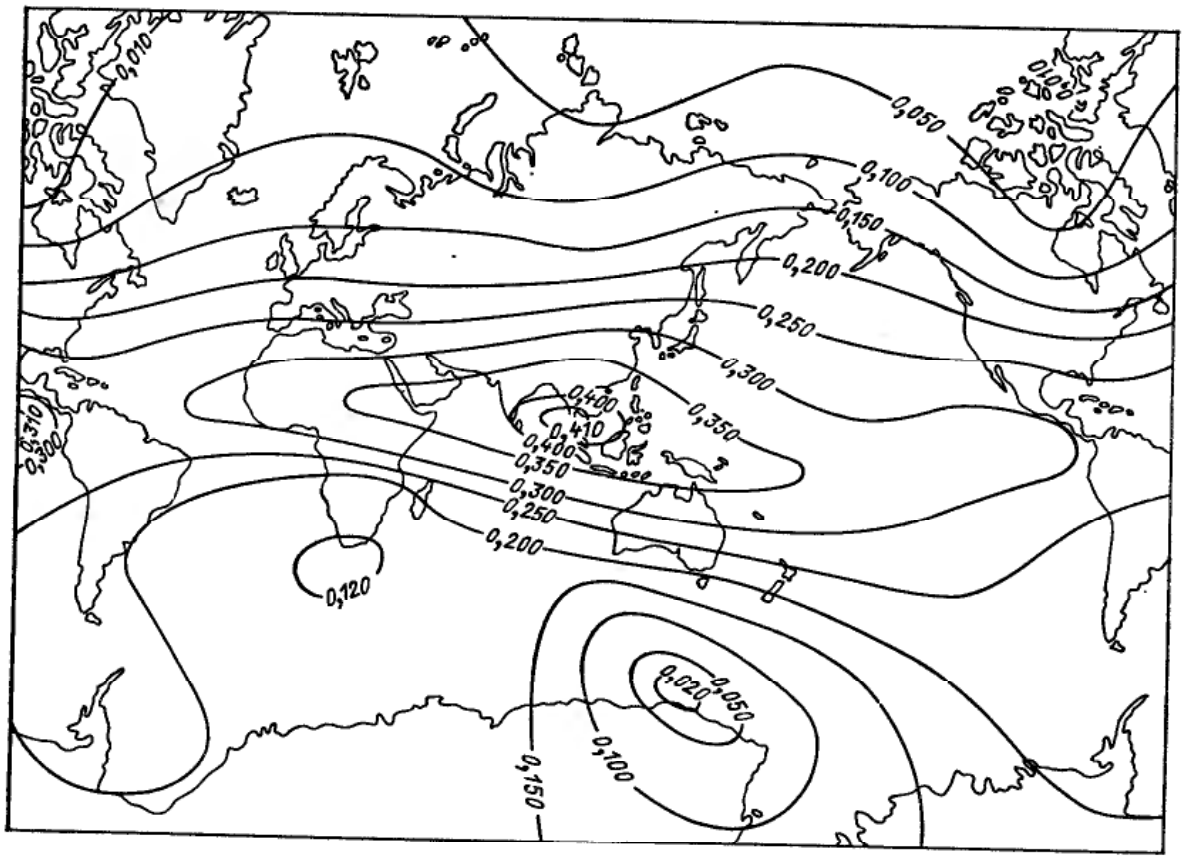


Рис. 44.3. Карта горизонтальной составляющей $H_н$ нормального геомагнитного поля, 10^{-4} Тл, эпоха 1980 г. [19]

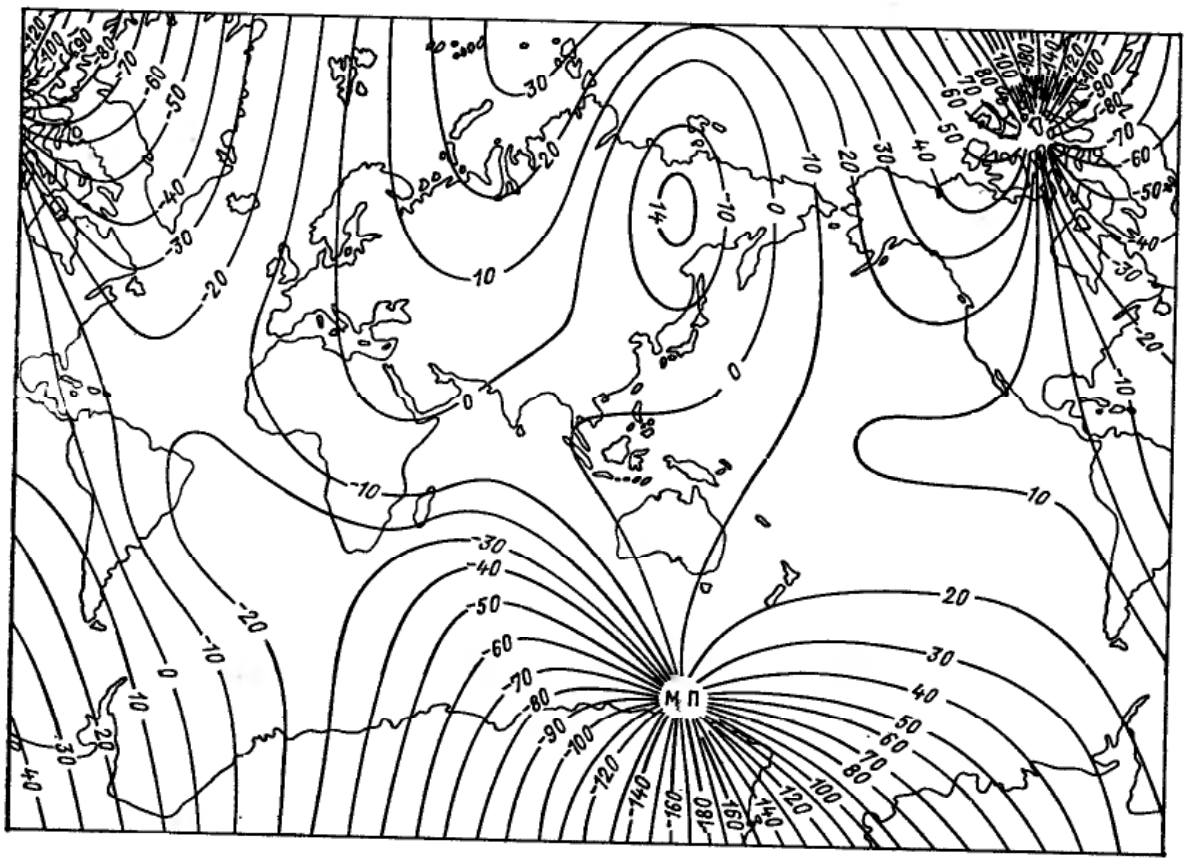


Рис. 44.4. Карта значений магнитного склонения, град, эпоха 1980 г. [19]

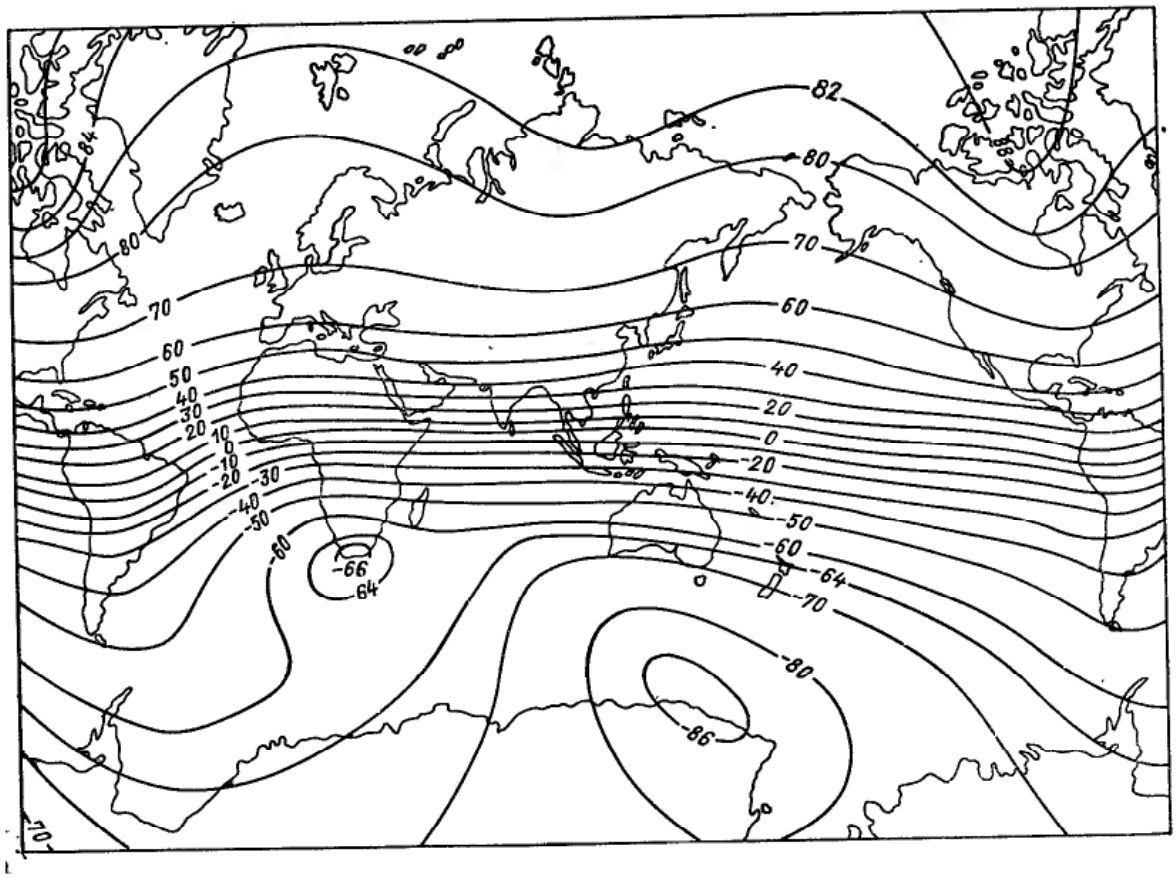


Рис. 44.5. Карта нормальных значений магнитного наклонения, град, эпоха 1980 г. [19]

Таблица 44.9. **Солнечно-суточные вариации геомагнитного поля, $0{,}3 \cdot 10^{-3}$ А/м [20]**

Составляющая напряженности	Годы низкой магнитной активности				Годы высокой магнитной активности			
	Средние широты		Высокие широты		Средние широты		Высокие широты	
	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни
Горизонтальная H	7—40	18—58	44—80	90—402	8—74	25—109	27—77	50—460
Вертикальная Z	4—16	9—36	20—90	103—305	6—26	14—128	15—70	128—315
Модуль полного вектора	6—26	11—64	20—65	150—300	8—35	13—104	35—110	230—275

собой. Плотность теллурических токов j для различных участков земной поверхности приблизительно одинакова: $j=2$ А/км^2. Интенсивность теллурических токов возрастает от низких широт к высоким. На низких широтах напряженность поля обычно не превосходит нескольких десятков милливольт на километр. В полярных странах напряженность может достигать единиц и даже десятков вольт на километр; наиболее сильны теллурические токи во время магнитных бурь.

Тепловое поле

Температура внутри Земли [23]. У поверхности Земли температура почвы и неглубоко залегших горных пород определяется балансом тепла, получаемого от Солнца и излучаемого в атмосферу. Роль терморегулятора играют водная и воздушная оболочки Земли. В среднем глубина проникновения суточных колебаний температуры почвы в зависимости от ее свойства и географических условий изменяется от 35 до 100 см. Запаздывание наступления экстремумов в среднем составляет 2—3 ч на каждые 10 см глубины.

Глубина проникновения годовых колебаний температуры составляет в низких широтах около 5—10 м, а в средних и высоких 8—24 м, доходя до 30 м. Глубина проникновения вековых изменений больше 50 м и сохраняется надолго вследствие запаздывания температурной волны по фазе с глубиной. Вечная мерзлота, распространяющаяся местами до нескольких сотен метров, является реликтом ледникового периода, минувшего несколько десятков тысяч лет назад. Наблюдения в шахтах и буровых скважинах показывают постепенное увеличение температуры с глубиной. На глубине около 2800 м в Калифорнии температура достигает 400 К, в разведочных скважинах на Северном Кавказе зарегистрирована температура около 430 К на глубине 3200 м. Скорость изменения температуры с глубиной характеризуется геотермическим градиентом или обратной ему величиной геотермической ступени. Значения dT/dh изменяются от 0,1 до 0,01 К/м. На дне океана

средние значения dT/dh порядка 0,08 К/м (для Тихого океана) и 0,04 К/м (для Северной Атлантики).

Средний поток тепла из недр Земли составляет около $5{,}0 \cdot 10^{-6}$ Дж/(см²·с). Диапазон изменений теплового потока на континентах — от $1{,}67 \cdot 10^{-6}$ до $12{,}56 \cdot 10^{-6}$ Дж/(см²·с); в океанах — от $\pm 0{,}42 \cdot 10^{-6}$ до $37{,}68 \cdot 10^{-6}$ Дж/(см²·с). Постоянным источником внутреннего тепла Земли являются радиоактивные элементы (табл. 44.10).

Таблица 44.10. **Среднее содержание радиоактивных элемеитов в главных типах осадочных пород, 10^{-6} г/г, и количество выделяемой энергии [24]**

Порода	^{235}U	^{232}Th	^{40}K	A, 10^{-13} Дж/(см²·с)
Пески и алевролиты	2,3	5,9	$16 \cdot 10^3$	11,30
Глины и глинистые сланцы	2,9	10,9	$20 \cdot 10^3$	16,7
Карбонаты	2,1	2,2	$7 \cdot 10^3$	5,44
Среднее	—	—	—	12,56

Охлаждение глубинных слоев Земли в настоящее время идет медленно. Активной в термическом отношении зоной являются верхние слои Земли до глубины 100—200 км, особенно в областях распространения кислых изверженных и магматических пород.

Тепловой баланс Земли [25]. Земля ежегодно поглощает 703 кДж/см², из них: 469 кДж/см² — земная поверхность; 234 кДж/см² — атмосфера Земли. Потери земной поверхностью на длинноволновое эффективное излучение составляют 167 кДж/см², потери на испарение — 247 кДж/см², передача в атмосферу через турбулентную теплоотдачу — 54 кДж/см².

44.3. ГИДРОСФЕРА

Мировой океан [26]

Площадь мирового океана составляет $361{,}3 \cdot 10^6$ км² (70,8% поверхности Земли), объем вод $1338{,}5 \cdot 10^6$ км³, средняя глубина 3705 м (табл. 44.11).

Таблица 44.11. **Главные морфометрические характеристики океанов [26]**

Океан	Площадь, 10^6 км²	Часть Мирового океана, %	Объем, 10^6 км³	Часть Мирового океана, %	Средняя глубина, м
Тихий	178,68	49,4	707,1	52,8	3957
Атлантический	91,66	25,4	330,1	24,7	3601
Индийский	76,17	21,1	284,7	21,3	3736
Северный Ледовитый	14,79	4,1	16,7	1,2	1129

Океаническое дно имеет три четко выраженные ступени: материковую отмель, материковый склон и ложе океана или моря. Материковая отмель (шельф, континентальное плато) является продолжением поверхности материков; занимает около 7,5% площади Мирового океана. Средняя ширина материковой отмели равна 78 км, однако у берегов Африки она практически отсутствует, а у северных берегов Азии имеет ширину несколько сот километров.

Со стороны океана материковая отмель ограничена бровкой, глубина которой — от 20 до 500 м (средняя глубина 133 м).

Материковый склон круто опускается от бровки материковой отмели к ложу океана или моря и занимает около 15,5% площади Мирового океана. Нижняя граница его проходит на глубине 2000—4000 м, ширина изменяется от нескольких километров до нескольких сотен километров. Средний угол наклона составляет около 3,5°, максимальный достигает 40—45°.

Ложе океана или моря — это центральная, преимущественно равнинная часть дна, расположенная на глубине свыше 2000—4000 м и составляющая около 77% площади Мирового океана. При взаимодействии поверхности океана с атмосферой возникает ветровое волнение (табл. 44.12).

Таблица 44.12. **Шкала силы (степеии) ветрового волнеиия и глубины распространеиия волн [26]**

Волнение, баллы	Характеристика	Размеры волн			Глубина распространения, м
		Высота, м	Длина, м	Период, с	
0	Отсутствует	0	0	0	0
I	Слабое	До 0,25	До 5,0	До 2,0	До 2,6
II	Умеренное	0,25—0,75	5—15	2—3	2,6—10,3
III	Значительное	0,75—1,25	15—25	3—4	10,3—19,2
IV	Значительное	1,25—2,0	25—40	4—5	19,2—33,7
V	Сильное	2,0—3,5	40—75	5—7	33,7—69,9
VI	Сильное	3,5—6,0	75—125	7—9	69,9—127,3
VII	Очень сильное	6,0—8,5	125—170	9—11	127,3—182,6
VIII	Очень сильное	8,5—11,0	170—220	11—12	182,6—245,3
IX	Исключительное	>11,0	>220	>12	>245,3

Таблица 44.13. **Распределение запасов воды на поверхности Земли [32]**

Запас воды	Объем, км³	Масса, кг
Океаны и моря	$1336 \cdot 10^6$	$1{,}3 \cdot 10^{21}$
Полярный лед	$3{,}5 \cdot 10^6$	$3{,}5 \cdot 10^{18}$
Озера	$2{,}5 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^{17}$
Подземные озера	$2{,}5 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^{17}$
Реки	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{16}$
Болота	$6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^{15}$
Снежный покров	250	$2{,}5 \cdot 10^{14}$
Полный запас	$\sim 1340 \cdot 10^6$	$(1{,}8 \div 2{,}7) \cdot 10^{18}$

Влагооборот (табл. 44.13). Общее количество воды, выпадающей за один год в виде осадков, для всего земного шара оценивается в $5 \cdot 10^{17}$ кг, что в 40 раз больше общего содержания воды в атмосфере. По современным данным (с погрешностью до 10%) общее количество осадков, выпадающих на поверхность Мирового океана, дает в среднем слой осадков 102 см/год,

что соответствует выпадению 370 000 км³ воды. Испарение с поверхности океана составляет 113 см/год, или 407 000 км³ воды, и речной сток в океаны оказывается равным 10,3 см/год, или 37 000 км³.

Для поверхности суши с учетом стока в океан получены следующие значения, см/год: осадки 70,0 (102 000 км³), испарение 44,6 (64 900 км³) и сток 25,4 (37 000 км³). На долю частей суши, не имеющих стока в океан, приходится всего около 8000 км³ осадков и столько же на испарение. В целом для земного шара годовой слой осадков, равный годовому испарению, составляет 92,8 см/год (472 000 км³), причем на сушу из общего количества осадков выпадает только 22%, а на океан 78%; испарение же с поверхности суши составляет 14% общего испарения, а остальные 86% испаряются с поверхности океана.

Таблица 44.14. **Средний химический состав океанической воды при $T = 5\%$ и хлорности 19%**

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Кислород	85,94	Медь	$6 \cdot 10^{-7}$
Водород	10,80	Свинец	$4 \cdot 10^{-7}$
Хлор	1,898	Марганец	$4 \cdot 10^{-7}$
Натрий	1,056	Селен	$4 \cdot 10^{-7}$
Магний	$1{,}272 \cdot 10^{-1}$	Цезий	$2 \cdot 10^{-7}$
Сера	$8{,}84 \cdot 10^{-2}$	Уран	$1{,}5 \cdot 10^{-7}$
Кальций	$4{,}00 \cdot 10^{-2}$	Молибден	$5 \cdot 10^{-8}$
Калий	$3{,}80 \cdot 10^{-2}$	Галлий	$5 \cdot 10^{-8}$
Бром	$6{,}5 \cdot 10^{-3}$	Торий	$<5 \cdot 10^{-8}$
Углерод	$3{,}0 \cdot 10^{-3}$	Никель	$3 \cdot 10^{-8}$
Азот	$1{,}7 \cdot 10^{-3}$	Ванадий	$3 \cdot 10^{-8}$
Стронций	$1{,}33 \cdot 10^{-3}$	Церий	$3 \cdot 10^{-8}$
Бор	$4{,}6 \cdot 10^{-4}$	Иттрий	$3 \cdot 10^{-8}$
Кремний	$>2 \cdot 10^{-4}$	Лантан	$3 \cdot 10^{-8}$
Фтор	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	Криптон	$2{,}8 \cdot 10^{-8}$
Аргон	$6{,}1 \cdot 10^{-5}$	Висмут	$2 \cdot 10^{-8}$
Рубидий	$2 \cdot 10^{-5}$	Неон	$1{,}1 \cdot 10^{-8}$
Литий	$1 \cdot 10^{-5}$	Кобальт	10^{-8}
Фосфор	$1 \cdot 10^{-5}$	Серебро	10^{-8}
Иод	$5 \cdot 10^{-6}$	Ксенон	$9{,}4 \cdot 10^{-9}$
Барий	$5 \cdot 10^{-6}$	Скандий	$4 \cdot 10^{-9}$
Мышьяк	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$	Ртуть	$3 \cdot 10^{-9}$
Цинк	$1 \cdot 10^{-6}$	Гелий	$5{,}2 \cdot 10^{-10}$
Алюминий	$1 \cdot 10^{-6}$	Золото	$5 \cdot 10^{-10}$
Железо	$1 \cdot 10^{-6}$	Радий	$(0{,}2 \div 3) \cdot 10^{-10}$

Таблица 44.15. **Важнейшие вещества, растворенные в морской, озерной и речной воде**

Вещества, растворенные в морской воде			Вещества, растворенные в озерной и речной воде		
Ионы	Концентрация, г/10³ кг	Общая масса, 10^{15} кг	Ионы	Концентрация, г/10³ кг	Общая масса, 10^{12} кг
Cl^{-}	19 360	30 976	CO_2	51,2	1178
Na^{+1}	10 770	17 232	CO^{+2}	29,8	680
SO_4^{-2}	2701	4 321	CO_4^{-2}	17,7	407
Mg^{+2}	1298	2 077	SiO_2	17,1	393
Ca^{+2}	408	653	Cl^{-1}	8,3	191
K^{+1}	387	619	Na^{+1}	8,4	193
HCO^{-1}	128	205	Mg^{+2}	5,0	155
Br^{-1}	66	106	$(Al, Fe)_2O_3$	4,0	92
H_3BO_3	27	43	K^{+1}	3,1	71
Sr^{+2}	14	22	NO_3^{-1}	1,3	30

Большая часть воды (90%) содержится в нижнем слое атмосферы (до 8—10 км) и составляет 0,3—0,4% массы атмосферного воздуха в этом слое. Основная часть воды в атмосфере находится в парообразном состоянии (около 95%), на долю облачных частиц (капель воды и кристаллов льда) приходится менее 5% массы воды, содержащейся в атмосфере.

Таблица 44.16. **Растворимость газов в морской и пресной воде в зависимости от температуры, см³/л**

Газ	В пресной воде при температуре, °С				В морской воде ($S = 35‰$) при температуре, °С			
	0	10	20	30	0	10	20	30
N_2	18,18	14,60	12,24	10,98	14,04	11,72	10,18	9,08
O_2	10,29	8,02	6,57	5,57	8,04	6,41	5,35	4,50
Ar	0,54	0,42	0,35	0,30	0,41	0,31	0,25	0,21
CO_2	0,52	0,36	0,26	0,20	0,44	0,31	0,23	0,18
Всего	29,45	23,40	19,42	17,05	22,93	18,75	16,01	13,97

Таблица 44.17. **Феноменологические коэффициенты воды при атмосферном давлении**

Название	Чистая вода		Океаническая вода ($S = 35‰$)	
	0°С	20°С	0°С	20° С
Динамическая вязкость $\rho\nu$, $г \cdot см^{-1} \cdot с^{-1}$	$1{,}787 \times 10^{-2}$	$1{,}002 \times 10^{-2}$	$1{,}877 \times 10^{-2}$	$1{,}075 \times 10^{-2}$
Теплопроводность $\varkappa$, $Вт \cdot см^{-1} \cdot К$	$5{,}66 \times 10^{-3}$	$5{,}99 \times 10^{-3}$	$5{,}63 \times 10^{-3}$	$5{,}96 \times 10^{-3}$
Кинематическая вязкость ν, $см^2 \cdot с^{-1}$	$1{,}787 \times 10^{-2}$	$1{,}004 \times 10^{-2}$	$1{,}826 \times 10^{-2}$	$1{,}049 \times 10^{-2}$
Температуропроводность $\varkappa/c_p\rho$, $см^2 \cdot с^{-1}$	$1{,}34 \times 10^{-3}$	$1{,}43 \times 10^{-3}$	$1{,}39 \times 10^{-3}$	$1{,}49 \times 10^{-3}$
Коэффициент диффузии D, $см^2 \cdot с^{-1}$ (NaCl)	$0{,}74 \times 10^{-5}$	$1{,}41 \times 10^{-5}$	$0{,}68 \times 10^{-5}$	$1{,}29 \times 10^{-5}$
Число Прандтля $\nu/\varkappa/c_p\rho$	13,3	7,0	13,1	7,0

Состав и свойства вод [27] (табл. 44.14—44.17)

Вследствие большой ионизирующей способности воды растворенные в ней соли оказываются в ионно-дисперсной форме. Относительное количество растворенных веществ в 1 л морской воды называется соленостью, выражается в промиллях и обозначается S, ‰. Существует связь между S, ‰, и хлорностью (содержанием хлора в морской воде), ‰:

$$S = 0{,}03 + 1{,}805\,Cl.$$

Средняя соленость морской воды $S = 34.85$ ‰, средняя хлорность $Cl = 19{,}37$‰.

Физические свойства океанической воды и льда [28]

Плотность ρ и электропроводность морской воды (табл. 44.18, 44.19) зависят от температуры, солености и давления. Значения плотности ρ в Мировом океане изменяются от 1,0757 до 0,9960 г/см³, поэтому для

Таблица 44.18. **Условная плотность морской воды σ_t, г/см³, в зависимости от температуры и солености S**

t, °C	S, ‰		
	32	35	38
0	25,71	28,13	—
14	23,90	26,21	—
28	20,17	22,41	24,67

Таблица 44.19. **Удельная электропроводность λ морской воды в зависимости от температуры и солености, 10^5 Ом/м**

t, °C	S, ‰			
	10	20	30	40
0	923	1747	2528	3276
15	1378	2594	3740	4834
25	1712	3214	4626	5967

удобства расчетов вводится условная плотность:

$$\sigma_t(t,\ S,\ P_a) \equiv \left\{\frac{\rho_t(t,\ S,\ P_a)}{\rho(4,\ 0,\ P_a)} - 1\right\}\cdot 10^3,$$

где $\rho(4,\ 0,\ P_a) = 1$ г/см³ — плотность пресной воды при температуре 4 °С и атмосферном давлении P_a.

Зависимость σ, г/см³, от солености S, ‰, определяется формулой

$$\sigma = (-0{,}093 + 0{,}8149S - 0{,}000482S^2 + 0{,}0000068S^3),$$

где

$$\sigma = (\rho_0 - 1)\cdot 10^3;\ \rho_0 = \rho(t = 0°C).$$

Характерные для поверхности моря значения плотности, зависящие от температуры, находятся в пределах от 0,9960 до 1,0283 г/см³.

Удельная теплоемкость океанической воды близка к 4,18 Дж/(г·К) и уменьшается при увеличении солености, температуры и давления. При атмосферном давлении, $t = 0$ °С и $S = 0$‰ она составляет 4,22 Дж/(г·К), а при $t = 30$ °С и $S = 40$‰ равна 3,87 Дж/(г·К). Удельная теплоемкость воды при $t = 0$ °С и $S = 34{,}85$‰ убывает от 3,93 Дж/(г·К) на поверхности до 3,89 Дж/(г·К) на глубине 1 км и до 3,64 Дж/(г·К) на глубине 10 км.

Теплопроводность. Решающую роль в распространении тепла в океане играет турбулентная теплопроводность при фрикционном и конвективном перемешивании вод.

Молекулярная теплопроводность воды очень невелика, например при $t = 17{,}5$ °С:

S, ‰	0	10	20	30
$10^3\varkappa$, Дж/(см·с·К)	5,81	5,69	5,65	5,57

Температура замерзания τ океанической воды понижается при увеличении солености S, ‰:

$$\tau = -0{,}003° - 0{,}0527°S - 0{,}0000004°\ S^3.$$

Температура замерзания воды, имеющей среднюю океаническую соленость ($S = 35$‰), равна — 1,9 °С, что гораздо ниже не только средней температуры поверхностного слоя воды, но и средней температуры (3,8 °С) всей водной толщи.

Вязкость воды складывается из молекулярной и турбулентной компонент. Молекулярная вязкость дистиллированной воды зависит от температуры:

t, °С	0	10	20	30
η, 10^3 Па·с	1,797	1,307	1,004	0,803

При $S = 40$‰ значения η на 6—9% выше приведенных.

Турбулентная вязкость во много раз превосходит молекулярную и является главной причиной фрикционного перемешивания вод.

Поверхностное натяжение α океанической воды уменьшается с ростом температуры и увеличивается с увеличением солености S и хлорности Cl. Зависимость α от t, °С и Cl, ‰, имеет вид

$$\alpha = (75{,}611 - 0{,}144\,t + 0{,}0399\,\mathrm{Cl}).$$

Физические свойства морского льда (табл. 44.20, 44.21) [29]

Морская вода не имеет определенной точки замерзания. При общей солености воды 33‰ образование льда начинается при —1,8 °С. Но между кристаллами льда остается небольшое количество морской воды, в которой отдельные соли выкристаллизовываются при более низких температурах, и только при —5,5 °С образовавшийся рассол полностью застывает. Соленость и количество находящегося во льду воздуха определяют плотность морского льда.

Таблица 44.20. **Плотность морского льда в зависимости от солености и содержания воздуха**

Объемное содержание воздуха, %	S, ‰			
	0	10	20	30
0	0,918	0,925	0,934	0,942
3	0,890	0,898	0,906	0,914
6	0,863	0,871	0,879	0,887
9	0,835	0,843	0,851	0,859

Таблица 44.21. **Зависимость температуры замерзания τ, °С, и температуры наибольшей плотности θ, °С, от солености S, ‰, океанической воды [30]**

S, ‰	0	5	10	15	20
τ, °С	0	—0,3	—0,5	—0,8	—1,1
θ, °С	3,98	2,9	1,9	0,8	0,3

Продолжение табл. 44.21

S, ‰	24,695	25	30	35	40
τ, °С	—1,332	—1,35	—1,6	—1,9	—2,2
θ, °С	—1,332	—1,4	—2,5	—3,5	—4,5

Оптические свойства океанической воды табл. (44.22—44.27) [28]

Таблица 44.22. **Оптические свойства чистой воды при $t = 20°$ С**

λ, нм	n	$\sigma(90°)$, 10^{-3} м$^{-1}$	σ, 10^{-3} м$^{-1}$	ε, 10^{-3} м	$\varkappa$, 10^{-3} м$^{-1}$	$A=\sigma/\varepsilon$	λ, нм	n	$\sigma(90°)$, 10^{-3} м$^{-1}$	σ, 10^{-3} м$^{-1}$	ε, 10^{-3} м$^{-1}$	$\varkappa$, 10^{-3} м$^{-1}$	$A=\sigma/\varepsilon$
250	1,377	2,00	32,0	220	190	0,15	550	1,334	0,082	1,3	36	35	0,036
300	1,359	0,96	15,0	55	40	0,27	560	1,334	0,076	1,2	40	39	0,030
320	1,354	0,74	12,0	32	20	0,38	580	1,333	0,066	1,1	75	74	0,015
350	1,349	0,51	8,2	20	12	0,41	600	1,333	0,058	0,93	200	200	0,0046
400	1,343	0,30	4,8	11	6	0,44	620	1,332	0,051	0,82	240	240	0,0034
420	1,342	0,25	4,0	9	5	0,44	640	1,332	0,045	0,72	270	270	0,0027
440	1,340	0,20	3,2	7	4	0,46	660	1,331	0,040	0,64	310	310	0,0021
460	1,339	0,17	2,7	5	2	0,54	680	1,331	0,035	0,56	380	380	0,0015
480	1,337	0,14	2,2	5	3	0,44	700	1,330	0,031	0,50	600	600	0,0008
500	1,336	0,12	1,9	8	6	0,24	740	1,329	0,025	0,40	2250	2250	0,0002
520	1,335	0,10	1,6	16	14	0,10	750	1,329	0,024	0,39	2620	2620	0,0001
530	1,335	0,095	1,5	23	22	0,065	760	1,329	0,022	0,35	2560	2560	0,0001
540	1,335	0,088	1,4	30	29	0,047	800	1,328	0,018	0,29	2020	2020	0,0001

Примечание. n — показатель преломления; σ — показатель рассеяния излучения; γ — угол рассеяния; ε — показатель ослабления излучения; $\varkappa$ — показатель поглощения излучения; A — прозрачность водной среды;

$$\sigma = -\frac{1}{\Phi}\frac{d\Phi_\sigma}{dl}; \quad \varepsilon = \frac{1}{\Phi}\frac{d\Phi_\varepsilon}{dl}; \quad \varkappa = -\frac{1}{\Phi}\frac{d\Phi_\varkappa}{dl},$$

где Φ — поток параллельного монохроматического излучения; dl — толщина облучаемого слоя объемом dV; $d\Phi_\sigma$, $d\Phi_\varepsilon$, $d\Phi_\varkappa$ — элементарные потоки излучения — соответственно рассеянный, ослабленный и поглощенный при прохождении dV.

Таблица 44.23. **Спектральная плотность облученности E_λ, 10^{-5} Вт/(см^2·нм), поверхности моря при высоте Солнца $h = 30°$**

λ, нм	E_λ	λ, нм	E_λ	λ, нм	E_λ	λ, нм	E_λ
400	5,23	525	7,87	625	7,16	725	5,98
425	5,85	550	7,19	650	6,89	750	5,70
450	7,41	575	7,72	675	6,58	775	5,45
475	8,15	600	7,53	700	6,26	800	5,18
500	8,27						

Таблица 44.24. **Спектральные показатели поглощения света океанической водой $\varkappa$, м$^{-1}$**

Место измерения	Глубина, м	Длина волны, нм									
		390	410	430	450	470	490	510	530	550	570
Саргассово море	0	0,041	0,034	0,025	0,016	0,014	0,018	0,023	0,039	0,050	0,067
Карибское море	0	0,20	0,090	0,034	0,023	0,016	0,014	0,014	0,023	0,032	0,055
Балтийское море (Готландская впадина)	0	0,71	0,48	0,34	0,23	0.15	0,090	0,064	0,064	0,032	0,055
Тихий океан (Галапагосские острова)	20	0,053	0,090	0,12	0,090	0,060	0,039	0,028	0,032	0,037	0,058
	200	0,067	0,062	0,044	0,034	0,025	0,014	0,014	0,028	0,032	0,058
(впадина Тонга)	10 000	0,058	0,037	0,023	0,012	0,009	0,009	0,016	0,025	0,032	0,055
Индийский океан	0	0,062	0,041	0,030	0,032	0,016	0,016	0,016	0,030	0,039	0,055

Примечание. Для $\lambda > 570$ нм значения $\varkappa$ практически не отличаются от значений $\varkappa$ для чистой воды (см. табл. 44.23).

Таблица 44.25. **Показатель полного молекулярного рассеяния $\sigma_м$, 10^{-3} м$^{-1}$, океанической воды в зависимости от λ, нм**

λ	$\sigma_м$	λ	$\sigma_м$	λ	$\sigma_м$	λ	$\sigma_м$	λ	$\sigma_м$
250	4,0	420	4,9	520	2,0	580	1,4	680	6,9
300	1,9	440	4,0	530	1,9	600	1,15	700	6,2
320	1,5	460	3,3	540	1,7	620	1,00	740	4,9
360	1,0	480	2,7	550	1,6	640	0,89	760	4,3
400	0,59	500	2,4	560	1,5	660	0,79	800	3,6

Таблица 44.26. **Показатель полного молекулярного рассеяния**

$\sigma_м$ (γ) для $\lambda = 546$ нм

γ, град	0; 180	10; 170	20; 160	30; 150
$\sigma_м$, 10^4, м$^{-1}\cdot$ср$^{-1}$	1,9	1,9	1,8	1,7

Продолжение табл. 44.26

γ, град	45; 135	60; 120	75; 105	90
$\sigma_м$, 10^4, м$^{-1}\cdot$ср$^{-1}$	1,5	1,25	1,1	1,0

Таблица 44.27. **Коэффициент преломления света в океанической воде в зависимости от длины волны λ и солености S**

λ, нм	S, ‰			
	0	10	20	30
667,8	1,33087	1,33271	1,33452	1,33726
587,6	1,33305	1,33491	1,33675	1,33951
501,6	1,33635	1,33824	1,34011	1,34293
447,2	1,33945	1,34138	1,34329	1,34616

Радиоактивность океанической воды (табл. 44.28—44.29) [28]

Таблица 44.28. **Содержание естественных радионуклидов в верхних слоях океанической воды (5—100 м)**

Радионуклид	Концентрация, г/см$^{-3}$	Удельная радиоактивность, Бк·см$^{-3}$	Общее количество в океане, 10^9 кг	Общая активность в океане, $3{,}7\cdot10^7$ Бк
^{40}K	$4{,}5\cdot10^{-8}$	$1{,}2\cdot10^{-2}$	63 000	460 000
^{87}Rb	$8{,}4\cdot10^{-8}$	$2{,}2\cdot10^{-4}$	118 000	8400
^{238}U	$2{,}0\cdot10^{-9}$	$1{,}0\cdot10^{-4}$	2800	3800
^{235}U	$1{,}5\cdot10^{-11}$	$3{,}0\cdot10^{-6}$	21	110
^{232}Th	10^{-11}	$1{,}0\cdot10^{-7}$	14	8
^{226}Ra	$3{,}0\cdot10^{-16}$	$3{,}0\cdot10^{-5}$	$4{,}2\cdot10^{-4}$	1100

Скорость звука в океане [30]

Наиболее простой для вычисления c, м/с, в зависимости от t, °С, и S, ‰, является формула

$$c = 1450 - 4{,}206\,t - 0{,}036\,t^2 + 1{,}137\,S - 35.$$

Погрешность расчета минимальна при $t = 10$ °С и не превышает 1,5 м/с. При увеличении t, S и глубины скорость звука возрастает. При увеличении S на 1‰ или глубины на 100 м скорость звука повышается на 1,2 и 1,6 м/с соответственно.

Таблица 44.29. **Искусственная радиоактивность в океане (γ-излучатели)**

Радионуклид	Период полураспада, годы	Энергия, МэВ	Диапазон удельной активности, Бк·см$^{-3}$	
			Открытый океан	Места сбросов
^{137}Cs	30	0,67	$5\cdot10^{-7}$—10^{-5}	10^{-5}—10^{-2}
^{60}Co	5,3	1,17—1,33	—	10^{-7}—10^{-4}
^{103}Ru + ^{106}Ru	1,0	0,51	$5\cdot10^{-7}$—$2\cdot10^{-5}$	10^{-5}—10^{-2}
^{141}Cl + ^{144}Cl	0,8	0,08—0,15	$5\cdot10^{-7}$—10^{-5}	—
^{51}Cr	0,1	0,32	—	10^{-4}—10^{-1}
^{65}Zn	0,7	1,2	—	10^{-5}—10^{-2}
^{95}Zr + ^{95}Nb	0,2	0,75	10^{-6}—10^{-5}	—

Приращение скорости звука Δc_t при изменении t на 1 °С зависит от температуры:

t, °С	5	10	15	20	25	30
Δc_t, м/с	4,1	3,6	3,2	2,8	2,4	2,1

Номограммы значений скорости звука в морской воде приведены в [31].

Таблица 44.30. **Нагревание слоя воды толщиной 1 м на различной глубине при поглощении 4186,6 Дж/см^2**

Залегание слоя, м	Нагрев воды, К	
	чистой океанической	мутной прибрежной
0—1	6,24	7,72
1—2	0,610	0,960
5—6	0,236	0,120
10—11	0,104	0,014
20—21	0,040	0,000

В океане под гомогенным поверхностным слоем температура с возрастанием глубины сильно понижается (табл. 44.30), скорость звука также уменьшается, однако одновременное увеличение давления влечет за собой некоторое повышение скорости звука. В зависимости от стратификации температуры и солености на глубине 700—1300 м наблюдается минимум скорости звука. Отчетливые минимумы скорости звука отсутствуют там, где термическая стратификация незначительна.

44.4. АТМОСФЕРА

Строение атмосферы [32]

Атмосфера не является однородной. Особенно резко ее свойства изменяются по вертикали. По составу, температурному режиму, электрическим характеристикам атмосфера в вертикальном направлении может быть разделена на ряд слоев. Особенно отчетливо различия в свойствах этих слоев проявляются в распределении температуры.

Прилегающий к Земле слой — тропосфера — характеризуется уменьшением температуры с высотой (порядка 6 К/км) и кончается тропопаузой на высоте 7 км на полюсе и 17 км на экваторе. Выше лежит стратосфера, где температура возрастает приблизительно от 200 К в тропопаузе до 280 К в стратопаузе (на высо-

те 50 км). Далее следует мезосфера, где температура уменьшается с высотой, достигая 170—180 К на высоте около 85 км (мезопауза).

Эти три слоя: тропосфера, стратосфера и мезосфера,— характеризуются неизменным газовым составом и носят общее название гомосферы.

Начиная с 85 км температура атмосферы вновь возрастает вследствие поглощения ультрафиолетового излучения Солнца. Средний градиент температуры равен 20 К/км до высоты 150 км, а далее рост постепенно замедляется и заканчивается на высоте 300 км. Эта область атмосферы называется термосферой и заканчивается термопаузой, которая находится днем на высоте 350—450 км, а ночью опускается до высоты 200—250 км. Термосфера и лежащий над ней обширный слой метасферы носят общее название гетеросферы. Вследствие этого разделения на высоте около 750 км преобладает атомарный кислород, а на высоте 1500 км — гелий.

Разделение газов заканчивается на высоте несколько тысяч километров переходом к водородному составу атмосферы. Чтобы выделить область, где столкновения между молекулами не мешают их вылету за пределы земной атмосферы, вводят термин «экзосфера». Экзосфера лежит выше 700 км.

На высоте до 200 км по характеру изменения температуры атмосфера делится на 11 слоев. Общим свойством всех слоев является линейность изменения молекулярной температуры $T_м$, K, с геопотенциальной высотой Ф. Геопотенциальная Ф и геометрическая Z высоты связаны соотношением $\Phi = rZ/(r+Z)$, где r — средний радиус Земли.

Молекулярная температура $T_м$ связана с кинетической T_0 зависимостью

$$T_м = T_0 M_0/M_z,$$

где M_0 и M_z — молекулярная масса воздуха на уровне моря и на рассматриваемой высоте соответственно. Для расчетов приняты следующие значения физических характеристик атмосферы на уровне моря и физических констант [32]:

барометрическое давление на географической широте $\varphi = 45°32'40''$ при температуре ртути 273,15 К и средней ртути 13595,1 кг/м³

$$P_0 = 1{,}01 \cdot 10^5 \text{ Па (760 мм рт. ст.)};$$

температура $t_0 = 15\ °C = 288{,}15$ К;

газовая постоянная сухого воздуха, Дж/(К·моль):

универсальная 8,31441
удельная 0,287055

динамическая вязкость воздуха при $T = 273$ К

$$\mu_0 = 1{,}75 \cdot 10^{-6} \text{ кг·с/м}^2 = 1{,}7162 \cdot 10^{-5} \text{ Па·с}.$$

ускорение свободного падения $g_0 = 980{,}665$ см/с².

Барометрическая формула. Для определения разности высот $Z_2 - Z_1$ между двумя точками, давление в которых равно P_2 и P_1, можно воспользоваться барометрической формулой Лапласа

$$Z_2 - Z_1 = 18\,400\,(1 + 0{,}00366\,\overline{t})\,(1 + 0{,}378\,(\overline{e}/P)) \times$$

$$\times (1 + 0{,}00264 \cos 2\varphi)\,(1 + 3{,}14 \cdot 10^{-7}\,\overline{h})\,\lg\,(P_1/P_2),$$

где $\overline{t}$, $\overline{h}$, $\overline{e}/P$ — средние значения температуры, высоты над уровнем моря и отношения парциального давления e водяного пара к атмосферному P. Если пренебречь зависимостью ускорения свободного падения от широты и высоты и считать воздух сухим, можно воспользоваться упрощенной барометрической формулой:

$$Z_2 - Z_1 = 18\,400\,(1 + 0{,}00366\,\overline{t})\,\lg\,(P_1/P_2).$$

По многочисленным данным, полученным прямыми и косвенными методами, определены характеристики некоторой средней, или стандартной, атмосферы (табл. 44.31 —44.34) [33].

Таблица 44.31. **Состав атмосферы и молярная масса**

Газ	Объемное содержание, %	Молярная масса M, кг/кмоль
Азот N_2	78,084000	28,01340
Кислород O_2	20,947600	31,99880
Аргон Ar	0,934000	39,94800
Углекислый газ CO_2	0,031400*1	44,00995
Неон Ne	$1{,}818 \cdot 10^{-6}$	20,18300
Гелий He	$524{,}0 \cdot 10^{-6}$	4,00260
Криптон Kr	$114{,}0 \cdot 10^{-6}$	88,00000
Ксенон Xe	$8{,}7 \cdot 10^{-6}$	131,30000
Водород H_2	$50{,}0 \cdot 10^{-6}$	2,01594
Окись азота N_2O	$50{,}0 \cdot 10^{-6}$ *1	44,01280
Метан CH_4	$200 \cdot 10^{-6}$	16,04303
Озон O_3	Летом до $7{,}0 \cdot 10^{-6}$*1 Зимой до $2{,}0 \cdot 10^{-6}$*1	47,99820
Сернистый ангидрид SO_2	До $100 \cdot 10^{-6}$*1	64,06280
Перекись азота NO_2	До $2{,}0 \cdot 10^{-6}$*1	46,00550
Иод I_2	До $1{,}0 \cdot 10^{-6}$*1	253,80880
Воздух	100	28,96442*2

*1 Содержание газа может подвергаться существенным изменениям в зависимости от места и времени измерения.
*2 Рассчитано по уравнению состояния идеального газа.

Таблица 44.32. **Параметры атмосферы на среднем уровне моря**

Параметр	Обозначение	Значение
Скорость звука, м/с	a_c	340,294
Ускорение свободного падения, м/с²	g_c	9,80665
Масштаб высоты по давлению, м	H_{Pc}	8434,5
Средняя длина свободного пробега частиц воздуха, м	l_c	$66{,}328 \cdot 10^{-9}$
Молярная масса, кг/кмоль	M_c	28,964420
Концентрация частиц, м⁻³	n_c	$25{,}471 \cdot 10^{24}$
Давление, Па	P_c	101325,0
Температура Кельвина, К	T_c	288,15
Средняя скорость частиц воздуха, м/с	v_c	458,94
Удельный вес, Н/м³	γ_c	12,013
Кинематическая вязкость, м²/с	ν_c	$14{,}607 \cdot 10^{-6}$
Динамическая вязкость, Па·с	μ_c	$17{,}894 \cdot 10^{-6}$
Теплопроводность, Вт/(м·К)	λ_c	$25{,}343 \cdot 10^{-3}$
Частота соударений частиц воздуха, с⁻¹	ω_c	$6{,}9193 \cdot 10^{9}$
Плотность, кг/м³	ρ_c	1,2250

Таблица 44.33. **Распределение молекулярной массы и температуры по высоте**

Высота, км	Молекулярная масса, а. е. м.	Температура, К		Градиент молекулярной температуры, К/м
		молекулярная	кинетическая	
0	28,966	288,15	288,15	—0,00651122
11	28,966	216,66	216,66	0
25	28,966	216,66	216,66	0,00276098
46	28,966	247,00	247,00	0
54	28,966	274,00	274,00	—0,00349544
80	28,966	185,00	185,00	0
95	28,966	185,00	185,00	0,00500000
110	28,934	257,64	257,36	0,00801741
120	28,727	335,00	332,24	0,02345357
150	28,107	1010,00	980,05	0,01987408
160	27,900	1199,40	1155,26	0,00308461
170	27,700	1228,71	1175,00	0,00308461
180	27,476	1257,93	1193,20	0,00308461
190	27,245	1287,06	1210,60	0,00308461
200	27,000	1316,10	1226,80	0,00308461

Радиационный баланс атмосферы (табл. 44.35, 44.36)

Солнечная постоянная равна полному количеству излучения, падающего на площадку 1 см^2, помещенную под прямым углом к солнечным лучам за пределами земной атмосферы на среднем расстоянии от Солнца до Земли [28]:

$$S_0 = 8{,}122 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{мин} = 1353 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}.$$

Отражение солнечного излучения (табл. 44.37) [32]. Альбедо — интегральное отношение отраженного по всем направлениям потока к потоку, упавшему на отражающую поверхность Земли, близко к 40%, причем основной вклад (75%) вносит альбедо облаков, а наименьшее значение (7%) имеет альбедо земной поверхности. Остальную часть составляет альбедо атмосферы.

Поглощение лучистой энергии в атмосфере (табл. 44.38) [32]. Основную роль в поглощении лучистой энергии в атмосфере играют кислород, озон, углекислый газ, водяной пар и пыль. В целом атмосферой поглощается 17—25% солнечного излучения. Кислород имеет полосы поглощения главным образом в ультрафиолетовой части спектра. В видимой части поглощение происходит в полосах A с центром около 0,76 мкм и B с центром около 0,69 мкм, однако поглощение в них мало и слабо влияет на ослабление излучения.

Озон образуется в результате поглощения солнечного излучения ($\lambda < 242{,}0$ нм) на высоте от 10 до 60 км с центром поглощения на высоте около 22 км. Основные полосы поглощения озона лежат также в ультрафиолетовой области. Наблюдаемый у земной поверхности спектр обрывается на длине волны ~300,0 нм. В этой области спектра поглощение озоном солнечного излучения составляет около 2—3% всего интегрального потока.

Наиболее важной полосой поглощения углекислого газа является широкая полоса 12,9—17,1 мкм, расположенная в максимуме теплового излучения атмосферы.

Важнейшее значение в поглощении лучистой энергии в атмосфере имеет водяной пар. Это определяется не только большим его содержанием, но и очень большим числом линий и полос в его спектре. Наибольшее значение из них имеют полосы, расположенные в инфракрасной области спектра.

В видимой области наиболее сильны две полосы: $\lambda \sim 730 \div 685$ нм и «дождевая» полоса 606—585 нм.

Таблица 44.34. **Отношения P/P_c, ρ/ρ_c и $\sqrt{\rho/\rho_c}$, скорость звука, вязкость и теплопроводность атмосферы в зависимости от геометрической высоты**

Геометрическая высота h, м	P/P_c	ρ/ρ_c	$\sqrt{\rho/\rho_c}$	Скорость звука a, м/с	Вязкость		Теплопроводность λ, 10^{-2} Вт/(м·К)
					динамическая μ, Па·с·10^{-5}	кинематическая ν, м^2/с	
—2000	1,26112	1,20666	1,09848	347,888	1,8515	1,2525—5	2,6359
—1500	1,19117	1,15218	1,07340	346,005	1,8361	1,3009—5	2,6106
—1000	1,12441	1,09966	1,04862	344,111	1,8206	1,3516—5	2,5853
—500	1,06073	1,04889	1,02416	342,208	1,8050	1,4048—5	2,5598
0	1,00000	1,00000	1,00000	340,294	1,7894	1,4607—5	2,5343
500	9,42130—1	9,52876—1	9,76154—1	338,370	1,7737	1,5195—5	2,5087
1000	8,87010—1	9,07477—1	9,52616—1	336,435	1,7579	1,5813—5	2,4830
2000	7,84618—1	8,21676—1	9,06464—1	332,532	1,7260	1,7147—5	2,4314
3000	6,92042—1	7,42248—1	8,61538—1	328,584	1,6938	1,8628—5	2,3795
4000	6,08541—1	6,68854—1	8,17835—1	324,589	1,6612	2,0275—5	2,3273
5000	5,33415—1	6,01166—1	7,75349—1	320,545	1,6282	2,2110—5	2,2747
6000	4,66002—1	5,38866—1	7,34075—1	316,452	1,5949	2,4162—5	2,2218
7000	4,05677—1	4,81648—1	6,94008—1	312,306	1,5612	2,6461—5	2,1687
8000	3,51854—1	4,29113—1	6,55144—1	308,105	1,5271	2,9044—5	2,1152
9000	3,03979—1	3,81276—1	6,17475—1	303,848	1,4926	3,1957—5	2,0614
10000	2,61533—1	3,37559—1	5,80999—1	299,532	1,4577	3,5251—5	2,0072
15000	1,19534—1	1,58983—1	3,98727—1	295,069	1,4216	7,2995—5	1,9518
20000	5,45699—2	7,25793—2	2,69405—1	295,069	1,4216	1,5989—4	1,9518
30000	1,18137—2	1,50286—2	1,22591—1	301,709	1,4753	8,0134—4	2,0345
40000	2,83388—3	3,26176—3	5,71119—2	317,189	1,6009	4,0067—3	2,2313
50000	7,87354—4	8,38264—4	2,89528—2	329,799	1,7037	1,6591—2	2,3954
60000	2,16714—4	2,52797—4	1,58996—2	315,073	1,5837	5,1141—2	2,2041
70000	5,15261—5	6,76150—5	8,22283—3	297,061	1,4377	1,7358—1	1,9765
80000	1,03871—5	1,50678—5	3,88172—3	282,536	1,3208	7,1558—1	1,7987

Примечание. Запись вида 5,15261—5 означает: 5,15261·10^{-5}.

Таблица 44.35. **Спектральная интенсивность солнечного излучения на верхней границе атмосферы S_0, Вт·см$^{-2}$·мкм, в зависимости от λ, нм [28]**

λ	S_0	λ	S_0	λ	S_0
0,22	0,0057	0,45	0,2006	0,80	0,1107
0,23	0,0067	0,46	0,2066	0,90	0,0889
0,24	0,0063	0,47	0,2033	1,00	0,0746
0,25	0,0070	0,48	0,2074	1,20	0,0484
0,26	0,0130	0,49	0,1950	1,40	0,0366
0,27	0,0232	0,50	0,1942	1,60	0,0244
0,28	0,0222	0,51	0,1882	1,80	0,0159
0,29	0,0482	0,52	0,1833	2,00	0,0103
0,30	0,0514	0,53	0,1842	2,20	0,0079
0,31	0,0689	0,54	0,1783	2,40	0,0064
0,32	0,0830	0,55	0,1725	2,60	0,0048
0,33	0,1059	0,56	0,1695	2,80	0,0039
0,34	0,1074	0,57	0,1712	3,00	0,0031
0,35	0,1093	0,58	0,1715	3,20	0,0023
0,36	0,1068	0,59	0,1700	3,40	0,0017
0,37	0,1181	0,60	0,1666	3,60	0,0013
0,38	0,1120	0,62	0,1602	3,80	0,0011
0,39	0,1098	0,64	0,1544	4,00	0,0009
0,40	0,1429	0,66	0,1486	4,50	0,0006
0,41	0,1751	0,68	0,1427	5,00	0,0004
0,42	0,1747	0,70	0,1369	6,00	0,0002
0,43	0,1639	0,72	0,1314	7,00	0,0001
0,44	0,1810	0,75	0,1235		

Таблица 44.36. **Средний радиационный баланс Северного полушария при средних условиях облачности [34]:**

Составляющие радиационного баланса	Поток энергии, мВт/см²
Инсоляция коротковолновым излучением на верхней границе атмосферы	35
Поглощение излучения в атмосфере:	
общее	6
озоном	0,9
водяным паром и пылью	4,5
облаками	0,6
Отражение и рассеяние излучения в мировое пространство:	
общее	123
атмосферой	2,4
облаками	8,4
земной поверхностью	1,5
Поглощение излучения земной поверхностью:	
общее	16,5
прямое солнечное	7,8
пропущенное облаками	5,0
рассеянное	3,7
Длинноволновое излучение (общее)	22,6
Эффективное излучение земной поверхности:	
тепловое	39,9
обратное излучение атмосферы	33,6
эффективное	2,1
Тепловое излучение тропосферы:	
поглощенное тропосферой	38
собственное	53,4
Тепловое излучение в мировое пространство:	
земной поверхности	1,9
тропосферы	19,7
стратосферы	0,98

Таблица 44.37. **Альбедо различных поверхностей**

Поверхность	Альбедо, %	Поверхность	Альбедо, %
Чернозем:		Вспаханное поле:	
сухой	14	сухое	8—12
влажный	8	влажное	5—7
Серозем:		Рожь и пшеница	10—25
сухой	25—30	Трава:	
влажный	10—12	свежая	26
Глина синяя:		высохшая	19
сухая	23	Древесная растительность	10—18
влажная	16		
Песок желтый:			
сухой	35		
серый	18—23		
речной	43		

Таблица 44.38. **Полосы поглощения водяного пара**

Полоса	α	β	ρ	σr	Ψ	Ω
Центр полосы λ, мкм	0,72	0,82	0,93	1,13	1,38	1,86
Полоса	ω_1	ω_2	x	—	y	
Центр полосы λ, мкм	2,01	2,05	2,68	3,2—4,0	4,0	—4,9

Электрические явления в атмосфере [32]

Ионы в атмосфере. В результате ионизации газов, входящих в состав атмосферы, образуются первичные (молекулярные) ионы и устойчивые комплексы из 10—15 молекул (легкие ионы). Путем присоединения легких ионов к частицам аэрозоля образуются более крупные — ионы тяжелые и ультратяжелые. Обнаруживаются также средние или промежуточные ионы (табл. 44.39, 44.40), природа которых не вполне ясна.

Таблица 44.39. **Основные группы атмосферных ионов [35]**

Группа ионов	Подвижность, см²/(В · с)	Радиус иона, нм
Легкие	10^{-2}—1	0,66—8
Средние	10^{-3}—10^{-2}	8—25
Тяжелые	10^{-3}—$2{,}5\cdot10^{-3}$	25—55
Ультратяжелые	$\leqslant 2{,}5\cdot10^{-3}$	>55

Капли тумана и облачных элементов имеют размеры 10^{-4}—10^{-3} см и могут иметь заряд, но к числу ионов обычно не относятся. Как правило, каждый ион несет один элементарный заряд, если его радиус меньше 10^{-6} см.

Из многочисленных известных ионизаторов главнейшими для нижних слоев атмосферы являются излучения радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре и атмосфере (табл. 44.41), а также космические лучи. Над океанами основным ионизатором является космическое излучение.

Электрическое поле в атмосфере. Почти всегда вертикальная составляющая электрического поля в ат-

Таблица 44.40. **Среднее число ионов, возникающих за 1 с в 1 см³ воздуха** [35]

Расположение воздушной массы	Ионизатор			Сумма
	Излучение радиоактивных элементов		Космическое излучение	
	почвы	воздуха		
Над сушей	4,0	4,6	1,5—1,8	10,1—10,4
Над океаном	—	—	1,5—1,8	1,5—1,8

Таблица 44.41. **Концентрация космогенных нуклидов в приземном слое воздуха** [28]

Нуклид	Концентрация, $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Бк · м$^{-3}$	Нуклид	Концентрация, $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Бк · м$^{-3}$
^{14}C	$5 \cdot 10^{-13}$	^{35}S	10^{-15}
^{7}Be	$(2—32) \cdot 10^{-14}$	^{32}P	$2 \cdot 10^{-16}$
^{3}H	$10^{-13}—10^{-14}$	^{22}Na	10^{-17}

мосфере значительно превосходит его горизонтальные составляющие, что соответствует отрицательному заряду земной поверхности. Средняя поверхностная плотность электрического заряда Земли равна $dQ/dS = -1{,}15 \cdot 10^{-13}$ Кл·см$^{-2}$. Полный заряд Земли равен $Q = -5{,}7 \cdot 10^{5}$ Кл. Приведенные значения получены в предположении, что средний вертикальный градиент электрического потенциала у земной поверхности равен 130 В/м.

Электрические заряды осадков. Частицы осадков всех видов несут на себе электрические заряды (табл. 44.42), которые возникают в результате нескольких групп процессов электризации, в числе которых соударение поляризованных частиц, захват частичками остатков воздушных ионов, разбрызгивание капель воды, электризация при изменении агрегатного состояния.

Таблица 44.42. **Электрический заряд Q осадков различного происхождения и ток i, создаваемый ими**

Характер осадков	$Q_{ср}$, Кл	Q_{max}, Кл	$i_{ср}$, А	i_{max}, А
Обложной дождь	$10^{-15}—10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-15}$	$5 \cdot 10^{-14}$
Ливневый дождь	$10^{-13}—10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	10^{-14}	$5 \cdot 10^{-13}$
Град	10^{-11}	10^{-10}	—	10^{-11}
Снег	$10^{-12}—10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	10^{-14}	$5 \cdot 10^{-13}$

Заряд отдельных капель меняется в очень широких пределах. Число положительно заряженных капель в среднем в 1,5 раза больше числа отрицательно заряженных. Это отношение меняется от 1 : 1 до 3 : 1. В то же время средний отрицательный заряд на одну каплю ($1{,}3 \cdot 10^{-12}$ Кл) больше положительного ($1{,}1 \cdot 10^{-12}$ Кл). Капли обложного дождя заряжены до 0,5—10 В, грозового ливня — до 300 В при среднем значении 40 В.

Стратификация атмосферы в зависимости от степени ионизации [35]. Наблюдения за распространением радиоволн показали, что газы, образующие атмосферу, ионизированы. Известны четыре регулярно наблюдаемых более или менее ярко выраженных слоя: D, E, F_1 и F_2.

Слои E и F_2 непрерывны и простираются над всем земным шаром, а слои D и F_1 появляются лишь в определенное время суток и года. Кроме того, в области непрерывных слоев E и F_2 время от времени появляются спорадические слои, представляющие собой отдельные облака с большой концентрацией ионов и электронов. Нижняя граница ионосферы совпадает с началом слоя D. Число электронов в 1 см³ составляет несколько тысяч. Слой D отражает длинные (в несколько километров) волны; при наклонном падении частично отражает и заметно поглощает короткие волны 30—100 м и сильно поглощает волны длиной 100—500 м. На высоте от 85—90 до 130—140 км располагается слой E — постоянно существующая область ионизации с максимумом концентрации электронов (до $\sim 2 \cdot 10^{+5}$ см$^{-3}$) на высоте 120—130 км. Ночью концентрация электронов уменьшается до $5 \cdot 10^{3}$ см$^{-3}$. Слой E днем отражает и заметно поглощает волны длиннее 10 м, а при наклонном падении отражает более короткие волны (15—10 м). На уровне максимальной концентрации электронов слоя E находится нижняя граница полярных сияний.

На высоте 200—500 км в области слоев F_1 и F_2 наблюдается наибольшая концентрация электронов. Слой F_1 образуется только летом в дневные часы в нормальных условиях на высоте 180—220 км. Максимальная концентрация электронов в слое F_1 составляет $(2 \div 5) \cdot 10^{5}$ см$^{-3}$. Слой F_1 существенно влияет на распространение коротких волн. Максимальная концентрация электронов в слое F_2 составляет несколько миллионов в 1 см³. Высота зоны максимальной концентрации 200—400 км. Состояние слоя F_2 оказывает большое влияние на распространение радиоволн в диапазоне 10—200 м. Выше максимума слоя F_2 концентрация ионов и электронов очень медленно уменьшается с высотой, приближаясь на высоте 2000—3000 км к концентрации межпланетного газа ($10^{3}—10^{2}$ см$^{-3}$).

Ионизация верхней атмосферы в сильной степени определяется влиянием Солнца; степень ионизации изменяется со временем суток, с сезоном и фазой цикла солнечной активности. Сильное влияние на ионизацию оказывает также бомбардировка атмосферы частицами солнечного происхождения, вызывающими магнитные бури и полярные сияния. Область E предположительно соответствует области диссоциации $O_2 \longrightarrow O + O$, а область D — ионизации O_2, соответствующей первому потенциалу ионизации. Максимумы ионизации областей F_1 и F_2 располагаются примерно на высоте 200 и 272 км соответственно. В течение ночи области F_1 и F_2 сливаются, образуя один слой ионизации. Слой D ночью исчезает, а слой E заметно рассасывается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Geodetic** Reference System 1967. Publication speciale du Bulletin geodesique. Paris: Bureau Central de l'AIG, 1970. P. 116.
2. **Moritz H.** Special Study Group 5.39. Fundamental geodetic constants. Trav. de l'AIG, t. 25, Rapports generaux et rapports techniques XVI Ass. Generale, Sept. 1975, Paris. 1976. P. 411—418.
3. **Морозов В. П.** Курс сфероидической гравиметрии: М.: Недра. 1979.
4. **Гутенберг Б.** Физика земных недр: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
5. **Джеффрис Г.** Земля, ее происхождение, история и развитие: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
6. **Косминская И. П.**//Вестник АН СССР. 1965. Т. 2. С. 51.
7. **Жарков В. Н.** Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1978. С. 126—127.
8. **Польдерварт А.**//Земная кора: Пер с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. С. 130—135.
9. **Берн Ф.** Там же. С. 114—117.

10. **Ферсман А. Е.** Геохимия. М.: Объединенное науч.-техн. изд-во, 1933—1939. Т. 1—4.
11. **Чердынцев В. В.** Распространенность химических элементов. М.: Гостехиздат, 1956.
12. **Веселов К. Е., Сагитова М. У.** Гравиметрическая разведка. М.: Недра, 1968.
13. **Ризниченко Ю. В.** Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985.
14. **Саваренский Е. Ф., Лириос Д. П.** Основы сейсмологии и сейсмометрии. М.: Гостехиздат, 1954.
15. **Эйби Дж. А.** Землетрясения: Пер. с англ. М.: Недра, 1982.
16. **Проскурякова Т. А., Рыкунов Л. Н.** Международный геофизический год. М.: Наука, 1963. Т. 5.
17. **Helton B. S., Jonson D. P.**//Proc. JBB. 1962. Vol. 50, N 11. P. 2328.
18. **Яновский Б. М.** Земной магнетизм. М.: Гостехиздат, 1953.
19. **Почтарев В. И.** Нормальное магнитное поле Земли. М.: Наука, 1984.
20. **Справочник** по переменному магнитному полю Земли. Л.: Гидрометеоиздат, 1954.
21. **Краев А. П.** Основы геоэлектрики. Л.: Изд-во ЛГУ, 1950.
22. **Виноградов П. А.**//Геология и геофизика. 1963. № 12. С. 111—115.
23. **Любимова Е. А.** Тектоносфера Земли. М.: Наука, 1978.
24. **Jecobs J. B.** The Earth Interior. Encicl. of Phisics. Ed. E. S. Flugge. Berlin: Springer Verlag 1956. Vol. 47.
25. **Будыко М. И., Кондратьев И. Я.**//Космические исследования. 1964. Т. 2, вып. 1. С. 62—68.
26. **Елизаров А. А. и др.** Океанологические основы рыболовства. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.
27. **Бруевич С. В.** Элементарный состав воды Мирового океана//Тр. Ин-та Океанологии АН СССР. М.: Наука, 1948. Т. 2.
28. **Физика** океана. Гидрофизика океана/Под ред. А. С. Монина. М.: Наука, 1978.
29. **Дитрих Г., Колле К.** Общее мореведение: Пер. с англ. Л.: Гидрометеоиздат, 1961.
30. **Гусев А. М.** Основы океанологии. М.: Изд-во МГУ, 1983.
31. **Баррс Л. С.** Таблица скорости звука в морской воде. М.: Изд. ВЦ АН СССР, 1961
32. **Тверской П. Н.** Курс метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1962.
33. **ГОСТ 4401-81.** Атмосфера стандартная. Параметры. М.: Изд-во стандартов, 1981.
34. **Аверкиев М. С.** Метеорология. М.: Изд-во МГУ, 1960. Т. 2.
35. **Николс М.** Аэрономия: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1964.

ГЛАВА 45

АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

Ю. Э. Любарский, Р. А. Сюняев

45.1. НЕКОТОРЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ И ПОСТОЯННЫЕ [1]

Наиболее часто используются следующие единицы:
астрономическая единица, 1 а.е.$=1{,}495989(1)\times$ $\times 10^{11}$ м;
парсек, 1 пк$=3{,}085778\cdot 10^{16}$ м;
световой год, 1 св. год$=9{,}460530\cdot 10^{15}$ м;
тропический год (от равноденствия до равноденствия), троп. год$=31\,556\,926$ с$=365{,}24219$ сут;
Янский (единица спектральной плотности потока), 1 Ян$=10^{-26}$ Вт/(м$^2\cdot$Гц).

Звездные величины [1—3]. Отношение освещенностей E_1 и E_2, создаваемых двумя звездами, связано с их звездными величинами m_1 и m_2 соотношением

$$E_2/E_1 = 10^{0{,}4\,(m_1 - m_2)}.$$

Абсолютная звездная величина M равна видимой звездной величине m, которую имел бы объект, находясь на расстоянии 10 пк:

$$M = m + 5 - 5 \lg r,$$

где r — расстояние, пк.

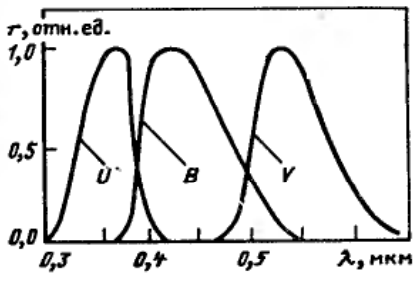


Рис. 45.1. Кривые пропускания фильтров U, B, V [3]

Поскольку получаемая от объекта энергия всегда измеряется в конечном интервале длин волн, обозначения видимых звездных величин снабжаются индексами, указывающими, в каком спектральном интервале проводилось измерение. Основной является трехцветная фотометрическая система UBV, в которой используются три стандартных спектральных интервала — ультрафиолетовый (U), голубой (B) и визуальный (V) (рис. 45.1). Цвет звезды характеризуется разностью между звездными величинами, измеряемыми в различных диапазонах, например $B-V$ или $U-B$. Звезда спектрального класса А0 имеет $U-B=B-V=0$. В настоящее время система UBV расширена в инфракрасный диапазон (табл. 45.1).

Звездная величина, соответствующая полному потоку энергии от объекта, называется болометрической

Таблица 45.1. **Система стандартных фотометрических полос** [3]

Полоса	Эффективная длина волны, мкм	Эффективная ширина, мкм	Плотность потока, соответствующая $m=0$, Ян
U	0,36	0,04	1880
B	0,44	0,10	4440
V	0,550	0,08	3810
R	0,700	0,21	3010
I	0,88	0,22	2430
J	1,25	0,3	1770
K	2,2	0,6	630
L	3,5	0,9	310
M	5,0	1,1	180
N	10,4	6,0	43

m_b. Светимость звезды с $M_b=0$ равна $2{,}97\cdot10^{28}$ Вт. Звезда с $m_b=0$ создает на границе земной атмосферы поток энергии плотностью $2{.}48\cdot10^{-8}$ Вт/м². Звезда с $m_V=0$ создает на границе земной атмосферы освещенность $2{,}54\cdot10^{-6}$ лк.

Приведены астрономические символы:

☉ *Солнце*	♁, ⊕ *Земля*	♅ *Уран*
☾ *Луна*	♂ *Марс*	♆ *Нептун*
☿ *Меркурий*	♃ *Юпитер*	♇ *Плутон*
♀ *Венера*	♄ *Сатурн*	☄ *Комета*
♈ *Овен, 0°*	♌ *Лев, 120°*	♐ *Стрелец, 240°*
♉ *Телец, 30°*	♍ *Дева, 150°*	♑ *Козерог, 270°*
♊ *Близнецы, 60°*	♎ *Весы, 180°*	♒ *Водолей, 300°*
♋ *Рак, 90°*	♏ *Скорпион, 210°*	♓ *Рыба, 330°*

Координаты на небесной сфере [2]. Перечислим основные точки и системы координат на небесной сфере.

Северный и южный полюсы мира — точки пересечения небесной сферы с продолжением земной оси в северном и южном направлениях.

Зенит и надир — точки пересечения небесной сферы с продолжением линии отвеса в точке наблюдения вверх и вниз.

Небесный экватор — большой круг, образуемый пересечением небесной сферы с плоскостью земного экватора.

Эклиптика — видимый путь Солнца по небесной сфере. Наклонена под углом $\varepsilon=23°27'$ к плоскости небесного экватора.

Точка весеннего равноденствия Υ — точка пересечения эклиптики с небесным экватором, которую Солнце проходит при движении из южного полушария в северное.

Галактический экватор — круг, образуемый пересечением небесной сферы с продолжением плоскости Галактики. Наклонен к плоскости небесного экватора под углом 62°36′.

Северный полюс Галактики: точка пересечения небесной сферы с продолжением оси вращения Галактики в северном направлении Экваториальные координаты $\alpha=12^h49^m$, $\delta=27°24'$.

Галактический центр имеет экваториальные координаты $\alpha=17^h42^m24^s$, $\delta=-28°55'$.

Экваториальная система координат (рис. 45.2). *Склонением* δ светила называется угол, выражаемый в в градусах и отсчитываемый от небесного экватора ло светила вдоль *круга склонения* (большого круга, проходящего через полюса мира и светило). Склонение считается положительным, если светило находится в северной полусфере. *Прямым восхождением* α называется угол, выражаемый в градусах (или часовой мере) и измеряемый от точки весеннего равноденствия вдоль небесного экватора в направлении от юга к востоку до точки пересечения небесного экватора с кругом склонения, проходящим через светило.

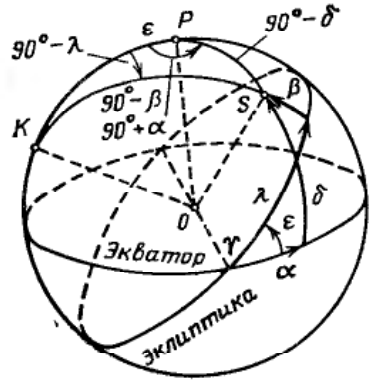


Рис. 45.2. Основные точки и координаты на небесной сфере: *K, P, S, O* — полюс эклиптики, северный полюс мира, положение тела и положение наблюдателя [2]

Эклиптическая система координат (рис. 45.2) *Астрономической широтой* β светила называется угол в градусах, измеряемый между эклиптикой и объектом вдоль *круга астрономической широты* (большого круга, проходящего через полюсы эклиптики и объект). Астрономическая широта считается положительной к северу от эклиптики. *Астрономической долготой* λ называется угол в градусах, измеряемый вдоль эклиптики через юг к востоку между точкой весеннего равноденствия и точкой пересечения эклиптики с кругом астрономической широты, проходящим через объект.

Галактическая система координат. Галактической широтой b светила называется угол, выражаемый в градусах и измеряемый вдоль круга *галактической широты* (большого круга, проходящего через галактические полюсы и светило) между галактическим экватором и светилом. Галактическая широта считается положительной к северу от галактического экватора. *Галактической долготой* l называется угол, выражаемый в градусах и измеряемый вдоль галактического экватора от галактического центра в направлении через юг к востоку до точки пересечения с кругом галактической широты, проходящим через светило.

45.2. СОЛНЦЕ

Приведем основные характеристики Солнца [1] (см. также рис. 45.3—45.5):

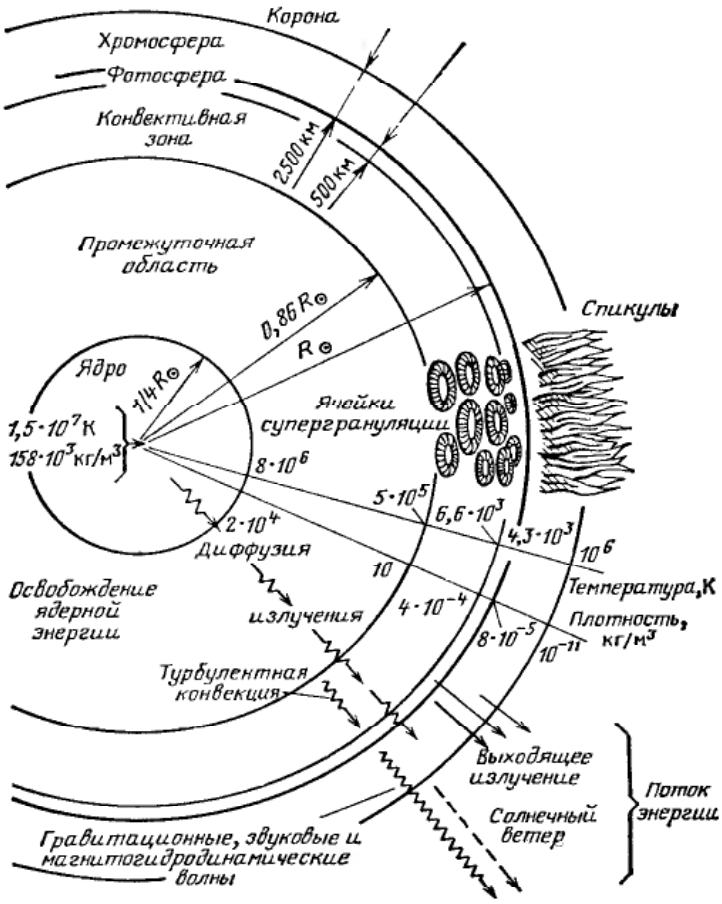


Рис. 45.3. Строение Солнца (масштаб не соблюден) [5]

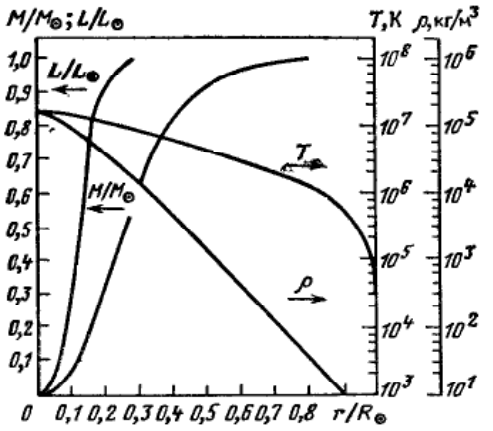


Рис. 45.4. Модель внутреннего строения Солнца [5]

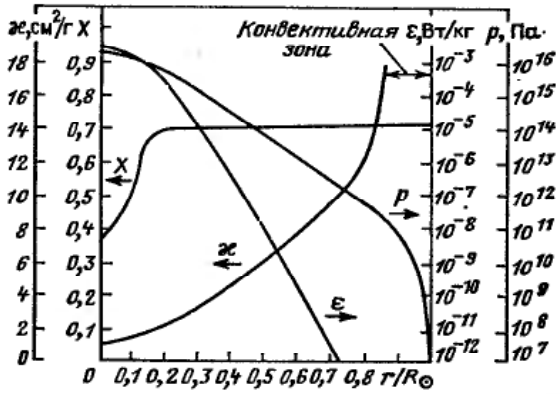


Рис. 45.5. Свойства солнечного вещества (X — доля водорода по массе, $\varkappa$ — непрозрачность, ε — скорость энерговыделения, p — давление) [5]

радиус $R_\odot = 6{,}9599(7) \cdot 10^{10}$ см;
масса $M_\odot = 1{,}989(1) \cdot 10^{33}$ г;
средняя плотность $\rho = 1{,}409$ г/см³;
сидерический период (относительно неподвижных звезд) вращения (на широте $\varphi = 17°$) 25,38 сут;
синодический (относительно Земли) период $26{,}75 + 5{,}7 \sin^2 \varphi$ сут;
наклон экватора к плоскости эклиптики 7°15′;
ускорение свободного падения на поверхности $2{,}740 \cdot 10^4$ см/с²;
средняя магнитная индукция вблизи полюсов при минимуме пятен $(1—2) \cdot 10^{-4}$ Тл;
угловой диаметр на среднем расстоянии от Земли 31′59,26″.

Солнце имеет следующее положение в Галактике [1]:
расстояние от галактического центра $(10 \pm 0{,}8)$ кпк;
расстояние от галактической плоскости к северу от нее (8 ± 12) пк.

Солнце движется относительно ближайших звезд со скоростью 15,5 км/с в направлении $\alpha = 17^h40^m$, $\delta = +21°$ [4]; скорость вращения вокруг центра Галактики 250 км/с.

Солнце как звезда имеет следующие характеристики [1]:
$m_V = -26{,}74$; $M_V = +4{,}83$;
$m_B = -26{,}09$; $M_B = +5{,}48$;
$m_U = -25{,}96$; $M_U = +5{,}61$;
$m_b = -26{,}82$; $M_b = +4{,}75$;
спектральный класс G2V; эффективная температура 5770 К; возраст $5 \cdot 10^9$ лет.

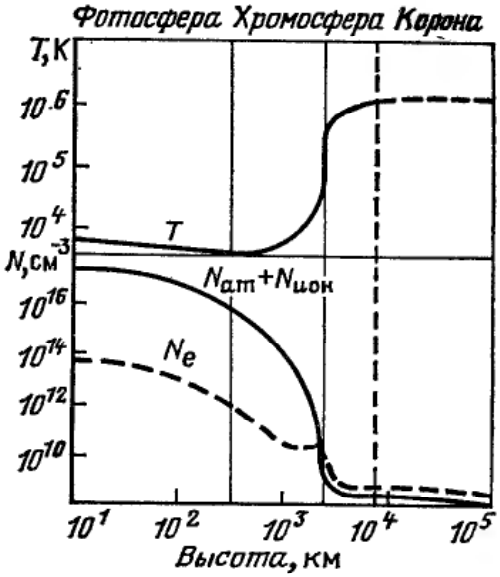


Рис. 45.6. Температура T и концентрация электронов N_e, ионов $N_{ион}$ и нейтронных атомов $N_{ат}$ в атмосфере Солнца. Высота отсчитывается от уровня единичной оптической толщины на длине волны 0,5 мкм [5]

Структура солнечной атмосферы (рис. 45.6) такова. *Фотосфера* — слой толщиной около 500 км, в котором формируется непрерывное излучение со спектром, близким к спектру излучения черного тела. На это излучение накладываются узкие линии поглощения — фраунгоферовы линии (табл. 45.2).

Хромосфера — переходная область между фотосферой и короной толщиной порядка 10^4 км. Излучает в линиях, которые наблюдаются во время затмения.

Корона — верхняя часть атмосферы Солнца, переходящая непосредственно в межпланетную среду. Высокая температура (порядка 10^6 К) короны поддерживается за счет энергии, выделяющейся при диссипации поднимающихся из фотосферы магнитных полей и диссипации звуковых и альфвеновских волн, возбуждаемых конвекцией в фотосфере. Электроны распределены в короне по закону [7]

$$N_e = 10^8 (0{,}036/r^{1{,}5} + 1{,}55/r^6 + 2{,}99/r^{16}).$$

Здесь N_e — плотность электронов, см$^{-3}$; r — расстояние от центра солнца, $R_\odot$. Свечение короны в непрерывном спектре обусловлено рассеянием света Солнца на электронах. Наблюдаются сильные запрещенные линии высокоионизованных тяжелых элементов (табл. 45.3). Соответствующие переходы запрещены правилами отбора в дипольном приближении, поэтому их верхние состояния являются метастабильными. В обычных условиях они девозбуждаются столкновениями, но в среде малой плотности столкновения редки и девозбуждение происходит с излучением запрещенного кванта. Излучательная способность короны характеризуется ее мерой эмиссии $ME = \int N_e^2 dV$; стандартное значение меры эмиссии короны равно $4{,}4 \cdot 10^{49}$ см$^{-3}$. Полный световой поток от короны за пределами 1,3 $R_\odot$ при максимуме пятен составляет $1{,}3 \cdot 10^{-6}$ полного потока от Солнца, при минимуме пятен — $0{,}8 \cdot 10^{-6}$ солнечного потока [1].

Наблюдаются вертикальные колебания атмосферы Солнца с периодом 5 мин. Их горизонтальный масштаб составляет 5000 км, амплитуда — около 0,4 км [5]. Некоторые данные указывают на колебания всей атмосферы Солнца или значительной ее части с периодом 160 мин [8]. Характеристики многочисленных нестационарных образований в атмосфере Солнца приведены в табл. 45.4.

Таблица 45.2. **Самые сильные фраунгоферовы линии в спектре Солнца [5]**

Длина волны, нм	Эквивалентная ширина W^*, нм	W/λ	Поглощающий атом или ион
358,1209	0,2144	$5{,}99\cdot10^{-4}$	FeI
371,9947	0,1664	$5{,}34\cdot10^{-4}$	FeI
373,4874	0,3027	$9{,}45\cdot10^{-4}$	FeI
373,7141	0,1071	$4{,}28\cdot10^{-4}$	FeI
374,5574	0,1202	$4{,}59\cdot10^{-4}$	FeI
374,9495	0,1907	$5{,}78\cdot10^{-4}$	FeI
375,015	0,1388	$4{,}30\cdot10^{-4}$	HI
375,8245	0,1647	$4{,}97\cdot10^{-4}$	FeI
377,063	0,1860	$6{,}21\cdot10^{-4}$	HI
379,790	0,3463	$10{,}85\cdot10^{-4}$	HI
382,0436	0,1712	$5{,}12\cdot10^{-4}$	FeI
382,5891	0,1519	$4{,}21\cdot10^{-4}$	FeI
383,2310	0,1685	$6{,}00\cdot10^{-4}$	MgI
383,539	0,2362	$7{,}19\cdot10^{-4}$	HI
383,8302	0,1920	$6{,}41\cdot10^{-4}$	MgI
385,9922	0,1554	$4{,}00\cdot10^{-4}$	FeI
388,905	0,2346	$7{,}22\cdot10^{-4}$	HI
393,3682	2,0253	$48{,}74\cdot10^{-4}$	CaII
396,8492	1,5467	$34{,}35\cdot10^{-4}$	CaII
397,0076	0,3076	$7{,}76\cdot10^{-4}$	HI ε
410,1748	0,3133	$7{,}46\cdot10^{-4}$	HI δ
434,0475	0,2855	$6{,}59\cdot10^{-4}$	HI γ
486,1342	0,3680	$7{,}50\cdot10^{-4}$	HI β
656,2808	0,4020	$6{,}49\cdot10^{-4}$	HI α

* Эквивалентная ширина — ширина соседнего с линией участка непрерывного спектра, энергия которого равна энергии, поглощенной в линии.

Таблица 45.3. **Некоторые линии излучения короны в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах [5]**

Переход	Ион	Длина волны, нм	Эквивалентная ширина, нм
$^2P_{3/2} \to {}^2P_{1/2}$	Ni XVI	360,1	0,13
$^2P_{3/2} \to {}^2P_{1/2}$	Fe XIV	530,3	2,00
$^1D_2 \to {}^3P_2$	Fe XIII	338,8	1,00
$^3P_2 \to {}^3P_1$	Fe XIII	107,98	3,00
$^3P_1 \to {}^3P_0$	Ni XV	670,2	0,12
$^3P_1 \to {}^3P_0$	Fe XIII	1074,7	5,00
$^3P_1 \to {}^3P_2$	Fe XI	789,2	0,60
$^2P_{1/2} \to {}^2P_{3/2}$	Fe X	637,4	0,50

Излучение Солнца характеризуют следующие величины [1]:

полная светимость $L_\odot = 3{,}826(8)\cdot10^{26}$ Вт;

поток излучения с единицы поверхности $6{,}284\times\times10^7$ Вт/м^2;

Таблица 45.4. **Характеристики образований в солнечной атмосфере [1, 3, 5]**

Образование	Размеры, км	Время жизни	Температура, К
Солнечные пятна	2000—10^5	1 сут — 10 мес	4200 (тень) 5700 (полутень)
Гранулы	10^3	10 мин	T (гранулы) — T (промежуток между гранулами) = 300 К
Ячейки супергрануляции	$(2\div4)\cdot10^4$	20 ч	—
Спикулы	1000 (горизонтальный); 7000 (вертикальный)	10 мин	$(1\div4)\cdot10^4$
Факелы	$5\cdot10^3$ км	10 сут	T (факел) — T (фотосфера) = 1000 К
Протуберанцы	30 000 (высота) 20 000 (длина) 5000 (ширина)	2 мес	$(6\div8)\cdot10^3$

сила света $2{,}84\cdot10^{27}$ кд;

освещенность, создаваемая Солнцем вне атмосферы Земли на среднем расстоянии Земли от Солнца, 127 000 лк;

солнечная постоянная (полная мощность излучения, которое падает на площадку единичной площади, помещенную вне атмосферы Земли на среднем расстоянии Земли от Солнца) 1373(20) Вт/м^2.

Спектр Солнца показан на рис. 45.7—45.10. Большая часть излучения приходит от фотосферы. В коротковолновой области ($\lambda \leqslant 100$ нм) спектр состоит из эмис-

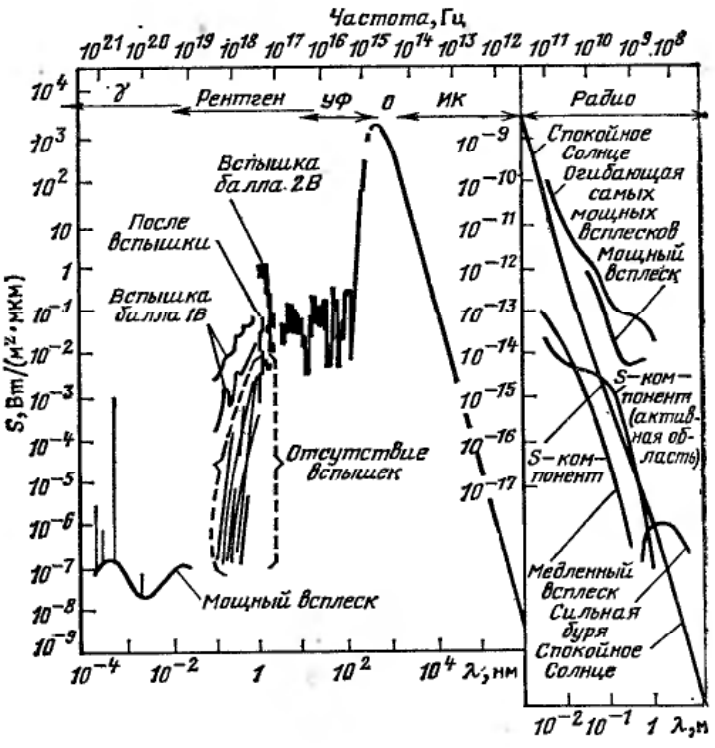


Рис. 45.7. Спектр Солнца [9]:

γ, рентген УФ, О, ИК, радио — γ-, рентгеновский, ультрафиолетовый, оптический, инфракрасный и радиодиапазоны; S — спектральная плотность потока

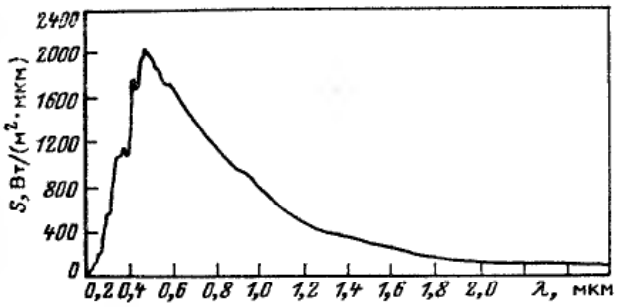


Рис. 45.8. Спектр Солнца ($\lambda = 0{,}2 \div 2{,}6$ мкм) [5]

сионных линий многочисленных ионов, образующихся в хромосфере и короне.

Радиоизлучение Солнца в спокойном состоянии обусловлено тепловым излучением короны. На длинах волн $\lambda > 1$ м яркостная температура излучения равна температуре электронов в короне (около 10^6 К). На меньших длинах волн корона становится прозрачной и ее яркостная температура убывает. При $\lambda \leqslant 1$ см доминирует тепловое излучение хромосферы. Наблюдается также медленно меняющееся тепловое излучение (*S*-компонент), интенсивность которого хорошо коррелирует с площадью солнечных пятен. Характеристики различных типов сильно нестационарного излучения, обусловленного взрывным выделением энергии в активных областях солнечной атмосферы, приведены в 45.5, 45.6.

Поток нейтрино от Солнца равен 2,1(3) солнечных нейтринных единиц [6] (1 солнечная нейтринная единица соответствует 10^{-36} поглощений за 1 с на 1 атом Cl в реакции $\nu + {}^{37}\mathrm{Cl} \longrightarrow e^- + {}^{37}\mathrm{Ar}$. Поскольку энергетический порог этой реакции составляет $E_\nu = 0{,}814$ МэВ, регистрируются только самые энергичные нейтрино, возникающие на Солнце в реакции ${}^8\mathrm{B} \longrightarrow {}^8\mathrm{Be}^* + e^+ + \nu$. Основной поток солнечных нейтрино генерируется в реакции $p + p \longrightarrow {}^2\mathrm{H} + e^+ + \nu$, однако энергия этих нейтрино $E_\nu < 0{,}420$ МэВ, и они не регистрируются).

Солнечный цикл [5]. Степень активности Солнца характеризуется числом Вольфа

$$W = 10g + f,$$

где g — число групп пятен; f — число солнечных пятен. Средняя продолжительность пятнообразовательного цикла (цикл активности Солнца) — 11,04 года (рис. 45.11). Наблюдались длительные периоды, когда пятнообразование прекращалось. Последний из них — маундеровский минимум — продолжался с 1645 по 1715 г.

45.3. ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКИ, МЕЖПЛАНЕТНАЯ СРЕДА [1]

Основные сведения о планетах Солнечной системы (см. также табл. 45.7—45.9, рис. 45.12, 45.13):

масса Земли $M_\oplus = 5{,}976(4) \cdot 10^{27}$ г;

экваториальный радиус Земли $R_\oplus = 6378$ км (о фигуре Земли см. гл. 44);

общая масса:

планет Солнечной системы 447,8 $M_\oplus$;

спутников планет 0,12 $M_\oplus$;

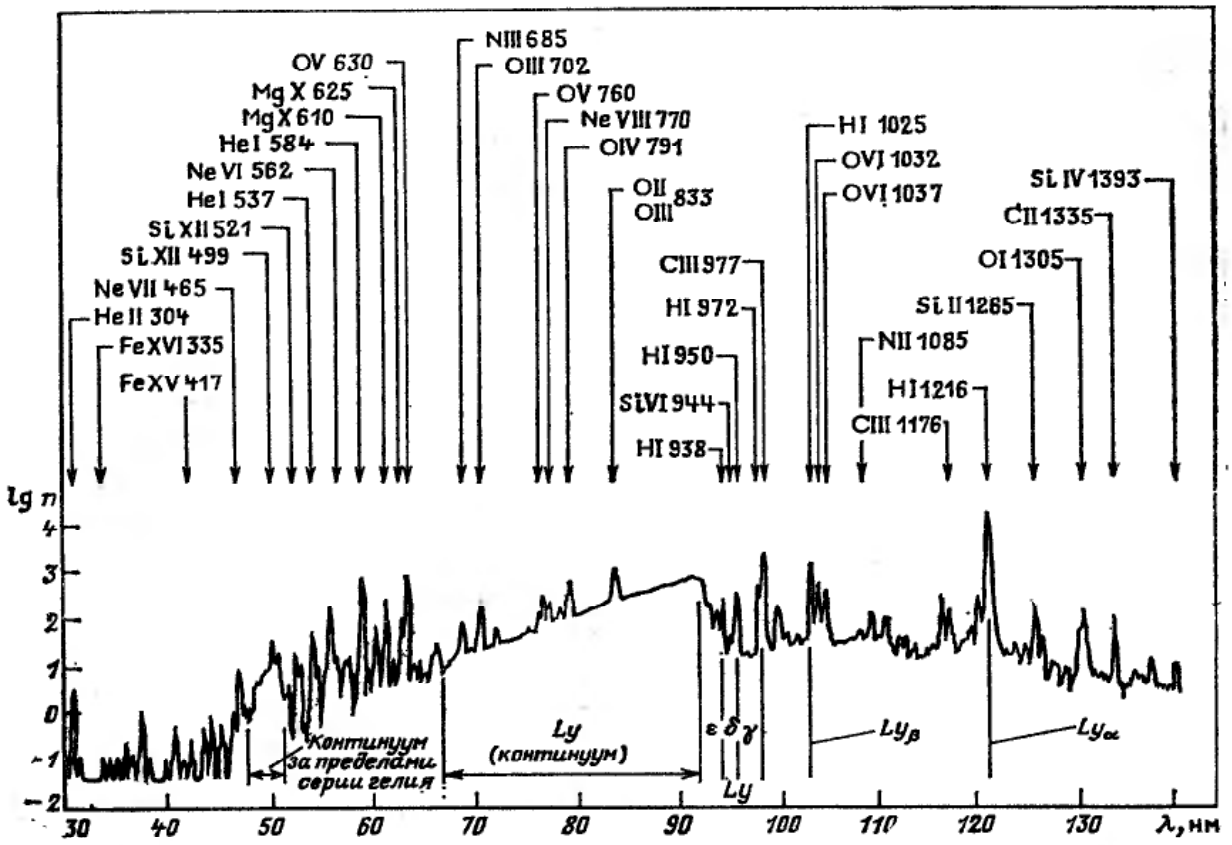


Рис. 45.9. Спектр Солнца в ультрафиолетовом диапазоне [5]:
n — число импульсов за 0,08 с

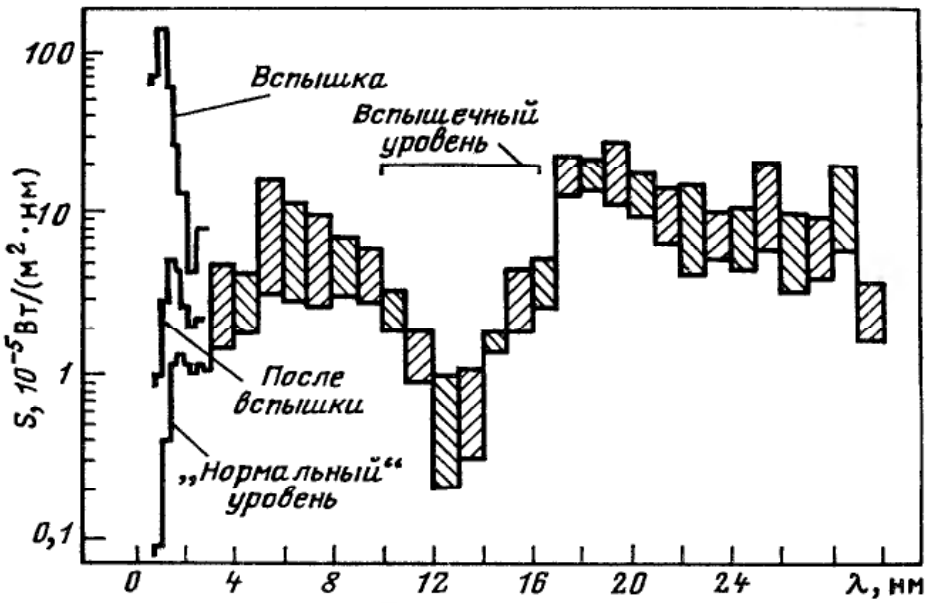


Рис. 45.10. Спектр Солнца в рентгеновском диапазоне [9]

Таблица 45.5. **Средние характеристики радиовсплесков** [10]

Характеристика	Микроволновые всплески			Всплески в метровом диапазоне							
	импульсные	постепенные	типа IV р.	типа IV*dm*	типа IV*mF*/*mA*	типа IV*mB*	Шумовые бури: континуальные	Шумовые бури: типа I	типа II	типа III	типа V
Диапазон частот, МГц	⩾1000			~150—1500	⩽200		⩽500		⩽200	⩽500	⩽200
Частота всплесков в максимуме солнечной активности	⩽1 ч$^{-1}$	⩾1 сут$^{-1}$	~1—10 в месяц, очень интенсивные всплески происходят в максимуме солнечной активности				~1—3 в неделю	⩾10^3 ч$^{-1}$	0,5 сут$^{-1}$	3 ч$^{-1}$ (группами)	1 ч$^{-1}$
Ширина полосы, МГц	~500—50 000		~5000—50 000	1000	>200	⩽200	<500	⩾4	~5	50—100	
Продолжительность	⩽10 мин	⩾10 мин	От 10 мин до нескольких часов			До нескольких часов	Часы или сутки	<1 с (группы ~0,5 мин)	5—30 мин	⩽10 с (группы 1 мин)	⩽1 мин
Яркостная температура, К	~10^6—10^{10}	⩽10^6	⩽10^9	10^7—10^8		⩽10^{10}		⩾10^{10}	⩽10^8—10^{11}		
Круговая поляризация	Отсутствует или частичная		Частичная	Частичная, сильная	Слабая	Очень сильная			Очень слабая	Частичная	
Линейная поляризация	Слабая	—	Частичная	10%			—	Очень слабая		Данные ненадежны	
Угловой размер источника, град	1—4	1—2	2—4	3—5	6—12	2—6	2—10	1—6	6—⩾30	3—12	

Таблица 45.6. **Характерные значения полной энергии, E, Дж, и мощности F, Вт, выделяемых в различных каналах для больших и малых солнечных вспышек [3]**

Канал	Самые большие вспышки		Субвспышка	
	E	F	E	F
Излучение:				
длинноволновое рентгеновское и ультрафиолетовое	$(3\div5)\cdot10^{24}$	$(3\div5)\cdot10^{21}$	$(1\div3)\cdot10^{22}$	$(1\div3)\cdot10^{20}$
оптическое непрерывное	$(1\div3)\cdot10^{24}$	$(1\div3)\cdot10^{21}$	—	—
в линии H_α	$(1\div3)\cdot10^{23}$	$(1\div3)\cdot10^{20}$	10^{19}	$3\cdot10^{16}$
коротковолновое рентгеновское	$(3\div5)\cdot10^{19}$	$(3\div5)\cdot10^{16}$	$(1\div3)\cdot10^{17}$ *	$(1\div3)\cdot10^{15}$
в γ-диапазоне	$(1\div3)\cdot10^{18}$	$(1\div3)\cdot10^{15}$	—	—
в радиодиапазоне	$\sim10^{17}$	$\sim10^{14}$	10^{15}	10^{13}
Ускоренные частицы:				
электроны ($\geqslant$20 кэВ)	$(3\div5)\cdot10^{24}$	$(3\div5)\cdot10^{21}$	10^{20} *	10^{18}
протоны ($\geqslant$20 МэВ)	$(1\div3)\cdot10^{24}$	$(1\div3)\cdot10^{21}$	—	—
Гидродинамические движения плазмы:				
межпланетные выбросы и ударные волны	$(1\div3)\cdot10^{25}$	—	—	—
движение над хромосферой	10^{25}	10^{22}	10^{22}	10^{19}

* Для подавляющего большинства субвспышек отсутствует.

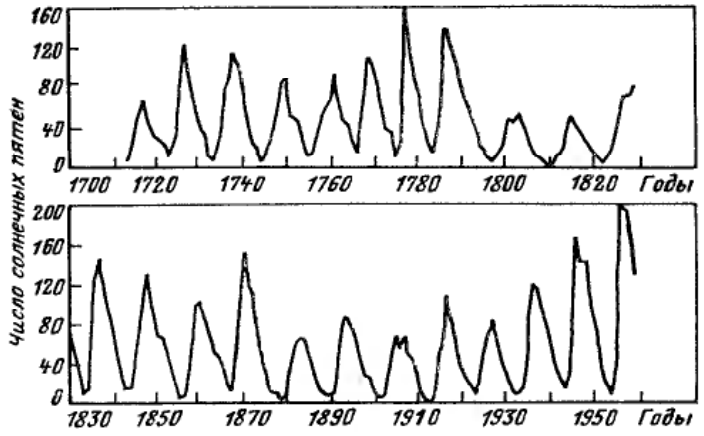


Рис. 45.11. Изменение числа Вольфа со временем [5]

астероидов $3\cdot10^{-4}\ M_\oplus$;

метеорнтного и кометного вещества $10^{-9}M_\oplus$;

планетной системы 448,0 $M_\oplus$.

Луна [1] имеет следующие характеристики:

среднее расстояние от Земли 384 401(1) км;

минимальное и максимальное удаление от Земли 356 400—406 700 км;

сидерический период (относительно неподвижных звезд) 27,322 сут;

синодический период (от новолуния до новолуния) 29,531 сут;

наклонение орбиты к эклиптике 5°8′43″, наблюдаются колебания ±9′ с периодом 173 сут;

эксцентриситет орбиты 0,0549;

наклонение экватора к эклиптике 1°32,5′, к орбите 6°41′;

средний радиус 1738,2 км;

масса $7{,}350\cdot10^{22}$ кг;

средняя плотность $3{,}341\cdot10^{3}$ кг/м^3;

Таблица 45.7. **Характеристики планет и их орбит [11]**

Планета	Большая полуось орбиты, а. е.	Орбитальный период	Наклонение орбиты к эклиптике, град	Эксцентриситет орбиты	Период вращения	Угол между осью вращения и перпендикуляром к плоскости орбиты	Магнитный момент [12], А·м^2	Масса, $M_\oplus$	Радиус, $R_\oplus$	Средняя плотность, г/см^3	Ускорение свободного падения на поверхности, см/с^2	Альбедо*
Меркурий	0,387	87,969 сут	7,00	0,206	58,7 сут	~0	$(2\div6)\cdot10^{25}$	0,055	0,382	5.4	370	0.06
Венера	0,723	224,701 сут	3,39	0,007	243 сут	—2	$<3\cdot10^{24}$	0,815	0,949	5.1	887	0.75
Земля	1,00	365,256 сут	—	0,017	23,9 ч	23,5	$8\cdot10^{28}$	1,00	1,00	5.5	9.9	0.36
Марс	1,52	1,88 года	1,85	0,093	24,6 ч	24,0	—	0,107	0,533	3.9	370	0,24
Юпитер	5,20	11,9 года	1,30	0.049	9.92 ч	3.1	$1{,}5\cdot10^{33}$	318	11,2	1,3	2450	0,50
Сатурн	9,54	29,5 года	2,49	0,056	10,7 ч	29	$4{,}7\cdot10^{31}$	95,2	9,45	0,7	1050	0,76
Уран	19,2	84,0 лет	0,77	0,047	23,9 ч	—82,1	—	14,6	4,10	1,2	852	0,62
Нептун	30,1	165 лет	1,77	0,009	17,8 ч	28,8	—	17,2	3,88	1,6	1117	0,50
Плутон	39,4	248 лет	17.2	0.249	6,39 сут	$\geqslant$50	—	$\sim0{,}002$	$\sim0{,}24$	0,8	~300	0,09

* Отношение количества света, отраженного всей поверхностью планеты, к количеству падающего на нее света.

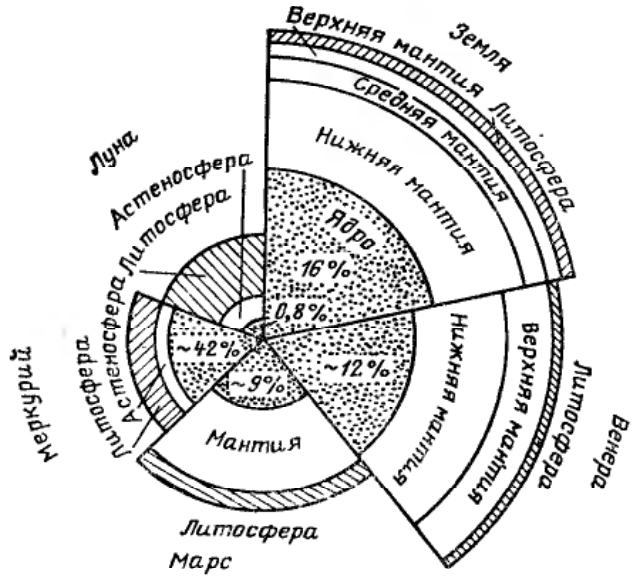


Рис. 45.12. Внутреннее строение планет земной группы. В процентах указаны относительные объемы ядер [13]

ускорение свободного падения на поверхности 1,622 м/с^2;

скорость освобождения на поверхности 2,38 км/с;

видимая звездная величина в полнолуние —12,73, альбедо 0,067.

Характеристики спутников планет приведены в табл. 45.10.

Астероиды [3, 15]. Насчитывается около 3000 астероидов с определенными орбитами (табл. 45.11), причем 98% астероидов движутся между орбитами Марса и Юпитера, образуя пояс астероидов. Параметры их орбит:

большие полуоси 2,2—3,2 а.е.;

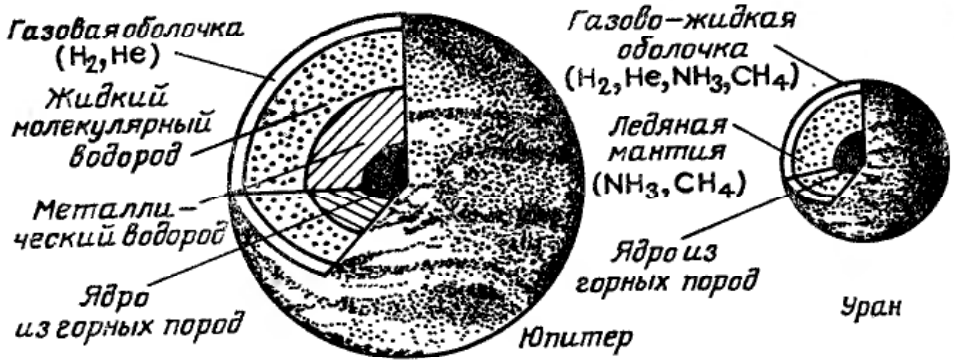


Рис. 45.13. Модели внутреннего строения Юпитера и Урана [13]

Таблица 45.8. **Основные характеристики атмосфер планет [13] (см. также рис. 45.14)**

Характеристика	Земля	Меркурий	Венера	Марс	Юпитер*
Химический состав (объемное содержание, %)	N_2 (78); CO (10^{-5}); O_2 (21); CH_4 (10^{-4}); Ar (0,93); H_2 ($5\cdot10^{-5}$); H_2O (0,1—1); Ne (10^{-3}); CO_2 (0,03); He (10^{-4})	—	CO_2 (95); HCl ($4\cdot10^{-5}$); N_2 (3—5); HF (10^{-6}); Ar (0,01); O_2 ($<5\cdot10^{-4}$); H_2O (0,01—0,1); SO_2 (10^{-5}); CO ($3\cdot10^{-3}$); H_2S ($8\cdot10^{-3}$)	CO_2 (95); N_2 (2—3); Ar (1—2); H_2O (10^{-3}—10^{-1}); O_2 (0,1—0,4)	H_2 (87); HCl (10^{-5}); He (12,8); C_2H_6 ($4\cdot10^{-2}$); H_2O (10^{-3}); C_2H_2 ($8\cdot10^{-3}$); CH_4 ($7\cdot10^{-2}$); PH_4 ($4\cdot10^{-5}$); NH_3 ($2\cdot10^{-2}$); CO ($2\cdot10^{-7}$)
Средняя молекулярная масса, а. е. м.	28,97	—	43,2	43,5	2,25
Температура у поверхности (в средних широтах), К	$T_{max} = 310$ $T_{min} = 240$	— —	735 735	270 200	135 —
Среднее давление у поверхности, Па	10^5	$<2\cdot10^{-9}$	$9\cdot10^6$	$6\cdot10^2$	$5\cdot10^7$
Средняя плотность у поверхности, г/см^3	$1{,}27\cdot10^{-3}$	$<10^{-17}$	$61\cdot10^{-3}$	$1{,}2\cdot10^{-5}$	10^{-4}

* Юпитер не имеет твердой поверхности. Данные приведены для нижней границы стратосферы.

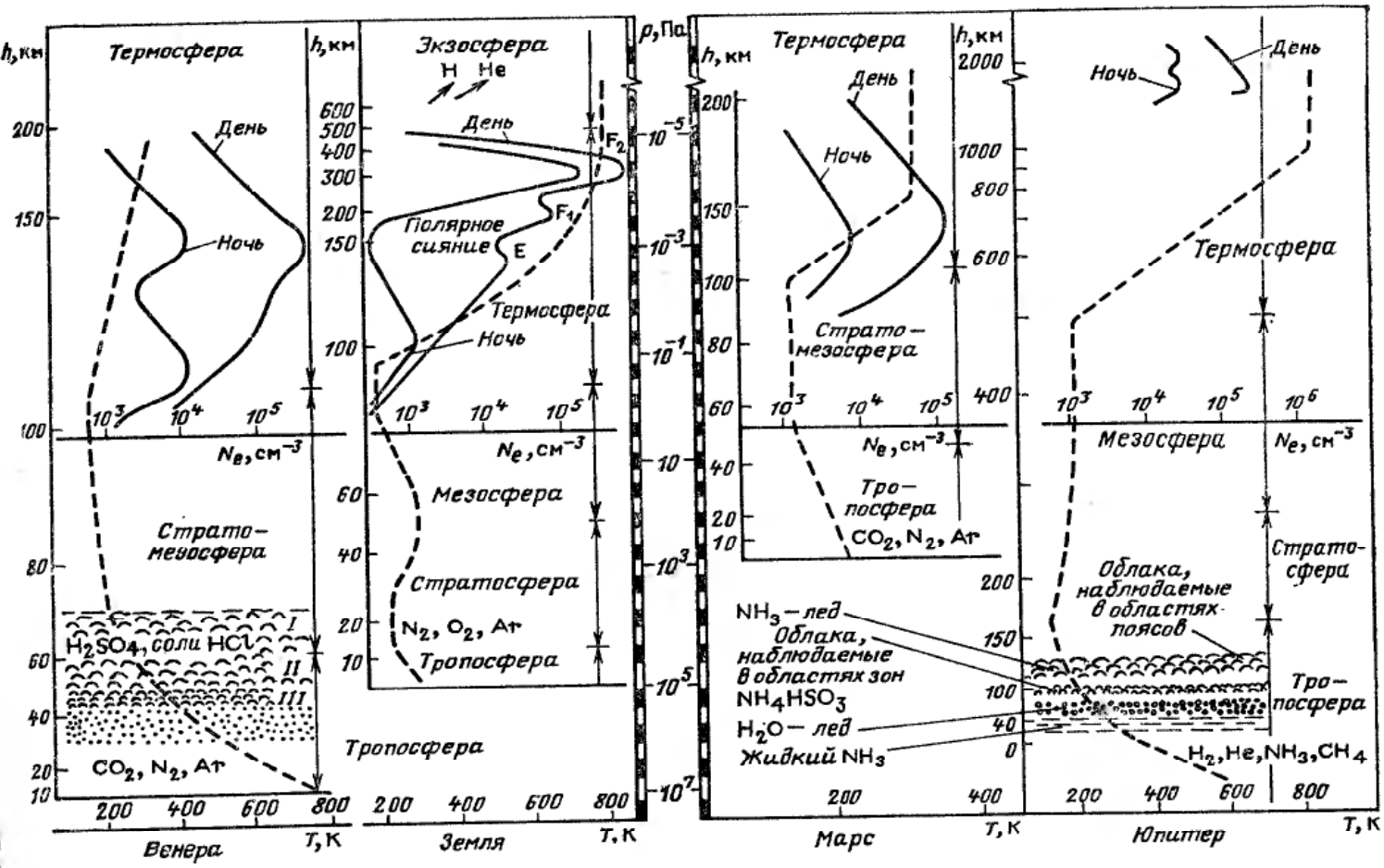


Рис. 45.14. Строение атмосфер Венеры, Земли, Марса, Юпитера. Показаны профили температуры T (пунктир) и электронной концентрации N_e (сплошные кривые). По вертикали отложены высота над поверхностью планеты h и давление p [13]

Таблица 45.9. **Характеристики колец вокруг планет [13, 14]**

Планета	Внешний радиус, км	Ширина, км	Толщина, км	Число
Юпитер	126 000	600	1	1
Сатурн	137 000	60 000	1—2	5
Уран	53 000	Переменная	—	9

периоды обращения 3—9 лет с пробелами около 4,0; 4,8 и 5,9 лет, т. е. 1/3, 2/5 и 1/2 периода Юпитера;
эксцентриситеты 0—0,2;
наклонение к эклиптике 5—15°.

Кометы [3, 16]. Источником комет в Солнечной системе служит облако Оорта, находящееся на расстоянии 10^4—10^5 а.е. от Солнца. Облако содержит около 10^{11} кометных ядер. Приведем характеристики комет (см. также табл. 45.12):

размеры ядра 0,5—20 км;
размеры головы на расстоянии около 1 а.е. от Солнца 10^4—10^6 км;
длина хвоста на расстоянии около 1 а.е. от Солнца 10^6—10^7 км;
расстоянне от Солнца, на котором появляется хвост, 4—6 а.е.;
масса 10^{11}—10^{16} кг.

Межпланетная среда. Параметры солнечного ветра (рис. 45.15) вблизи орбиты Земли [3, 18]:

скорость 400—700 км/с;
температура $5\cdot10^4$—$5\cdot10^5$ К;
магнитная индукция 10^{-8}—10^{-9} Тл (рис. 45.16);
плотность 1—10 $см^{-3}$;
поток массы 10^{11}—10^{13} г/с;
поток кинетической энергии 10^{19} Вт.

Гелиопауза (граница между солнечным ветром и межзвездной средой, рис. 45.17) находится на расстоянии от Солнца около 200 а.е. [19].

Размер зоны ионизованного водорода, окружающей Солнце, [20] в направлении движения Солнца составляет 5,5 а.е., в противоположном направлении — 20 а.е., под прямым углом к скорости движения — 10 а.е. Скорость движения Солнца относительно межзвездной среды 20 км/с в направлении $\alpha=252°$, $\delta=-15°$.

Межпланетная пыль [3] образует диск в плоскости эклиптики радиусом около 3 а.е., масса пылинок 10^{-3}—10^{-5} г. Полная масса пыли в Солнечной системе 10^{19}—10^{20} г. Наклонение орбит пылинок к эклиптике не превосходит 30—40°.

Таблица 45.10. **Характеристики спутников и их орбит [11] (в скобках указаны неустоявшиеся названия)**

	Спутники	Большая полуось, км	Орбитальный период, сут	Эксцентриситет	Наклонение орбиты к эклиптике, град	Масса, $M_{\mathbb{C}}$	Радиус, км
	Спутники Марса						
	Фобос	9,380	0,319	0,018	1,0	$1{,}3\cdot10^{-7}$	13 (1)
	Деймос	23,500	1,26	0,002	2,0	$2{,}7\cdot10^{-8}$	7,5 (1)
	Спутники Юпитера						
	(Адрастея)	128 000	0,297	~ 0	~0	—	~ 20
	(Метис)	127 000	0,295	~ 0	~0	—	~ 20
	Амальтея	181 000	0,489	0,003	0,4	—	135 (1)
	Теба	221 000	0,670	0	0	—	40
Галилеевы спутники	Ио	422 000	1,77	Малый переменный	0,0	1,2	1816
Галилеевы спутники	Европа	671 000	3,55	То же	0,0	0,66	1563
Галилеевы спутники	Ганимед	1 070 000	7,16	0,001*1	0,2	2,0	2638
Галилеевы спутники	Каллисто	1 880 000	16,7	0,01	0,2	1,5	2410
	Леда	11 100 000	240	0,146*1	26,7	—	~ 5
	Гималия	11 500 000	251	0,158*1	27,6	—	~ 90
	Лизифоя	11 700 000	260	0,130*1	29,0	—	~ 10
	Элара	11 700 000	260	0,207*1	24,8	—	~ 40
	Ананке	20 700 000	617*2	0,17*1	33	—	~ 10
	Карма	22 400 000	692*2	0,21*1	16	—	~ 15
	Пасифея	23 300 000	735*2	0,38*1	35	—	~ 20
	Синопа	23 700 000	758*2	0,28*1	27	—	~ 15
	Спутники Сатурна						
	(Атлас)	138 000	0,602	0,002	0,3	—	20 (1)
	S27	139 000	0,613	0,004	0,0	—	70 (1)
	S26	142 000	0,629	0,004	0,1	—	55 (1)
	Эпиметеус	151 000	0,694	0,009	0,3	—	70 (1)
	Янус	152 000	0,695	0,007	0,1	—	110 (1)
	Мимас	186 000	0,942	0,020	1,5	~0,0005	196
	Энцелад	238 000	1,37	0,004	0,0	~0,001	255
	Тефия	295 000	1,89	0,000	1,1	~0,01	530
	Телеста	295 000	1,89	—	—	—	17 (1)
	Каллипсо	295 000	1,89	—	—	—	17 (1)
	Диона	377 000	2,74	0,0022	0,0	0,014	560
	S6 (Диона B)	377 000	2,74	0,005	0,2	—	18 (1)
	Рея	527 000	4,52	0,001	0,4	0,034	765
	Титан	1 220 000	16,0	0,029	0,3	1,8	2575
	Гиперион	1 480 000	21,3	0,104	0,4	—	205 (1)
	Япет	3 560 000	79,3	0,028	14,7*1	0,026	730
	Феба	13 000 000	550*2	0,163	30	—	110
	Спутники Урана						
	Миранда	130 000	1,41	0,000	~0	0,0005	~160
	Ариель	192 000	2,52	0,003	~0	0,03	~705
	Умбриэль	267 000	4,14	0,004	~0	0,01	~580
	Титания	438 000	8,71	0,002	~0	0,04	~845
	Оберон	586 000	13,5	0,001	~0	0,04	~760
	Спутники Нептуна						
	Тритон	355 000	5,88*2	0,000	20	0,8	1600
	Нереида	5 560 000	360	0,75	28	$2\cdot10^{-8}$	470
	Спутник Плутона						
	(Харон)	~ 17 000	6,39	~ 0	—	~ 0,02	~ 400

*1 Эксцентриситет орбиты переменный.
*2 Вращение обратное.

Таблица 45.11. **Параметры некоторых астероидов и их орбиты [1, 15]**

Название	Радиус, км	Масса, кг	Период вращения	Орбитальный период, сут	Большая полуось орбиты, а. е.	Эксцентриситет	Наклонение орбиты к эклиптике, град
Церера	500	$1{,}2\cdot10^{21}$	9 ч 05 мин	1681	2,766	0,079	10,6
Паллада	304	$2{,}3\cdot10^{19}$	10 ч	1684	2,768	0,235	34,8
Юнона	123	—	7 ч 13 мин	1594	2,668	0,256	13,0
Веста	269	$2{,}4\cdot10^{19}$	5 ч 20 мин	1325	2,362	0,088	7,1
Геба	100	—	7 ч 17 мин	1380	2,426	0,203	14,8
Ирис	104	—	7 ч 07 мин	1344	2,386	0,230	5,5
Гигия	225	—	18 ч	2042	3,151	0,099	3,8
Евномия	136	—	6 ч 05 мин	1569	2,643	0,185	11,7
Психея	125	—	4 ч 18 мин	1826	2,923	0,135	3,1
Икар	0,7	—	2 ч 16 мин	408	1,078	0,827	23,0

Таблица 45.12. **Характеристики некоторых короткопериодических комет [1, 16]**

Комета	Прохождение перигелия		Период, лет	Наклонение орбиты к эклиптике, град	Эксцентриситет	Перигелийное расстояние, а. е.	Большая полуось, а. е.
	последнее, год	число возвращений					
Галлея	1986	30	76,1	162	0,97	0,59	17,8
Энке	1977	51	3,31	12	0,85	0,34	2,21
Темпеля-2	1978	16	5,26	12	0,55	1,37	3,0
Ольберса	1956	3	69	45	0,93	1,20	16,8
Кроммелина	1956	6	27,9	29	0,92	0,74	9,2
Понса — Брукса	1954	3	71	74	0,96	0,78	17,2

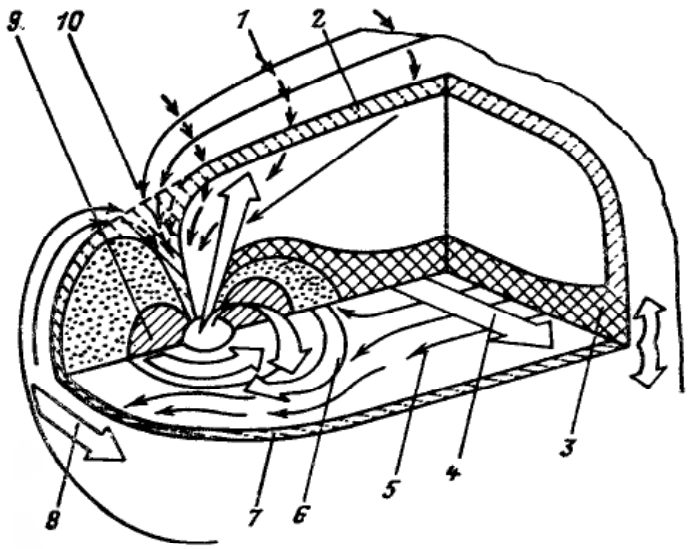


Рис. 45.15. Обтекание магнитосферы Земли солнечным ветром [17]:

1 — межпланетное магнитное поле; *2* — плазменная мантия; *3* — плазменный слой; *4* — ток поперек хвоста; *5* — конвекция плазмы; *6* — кольцевой ток; *7* — магнитопауза; *8* — ток на магнитопаузе; *9* — плазмосфера (вращается вместе с Землей); *10* — каспы

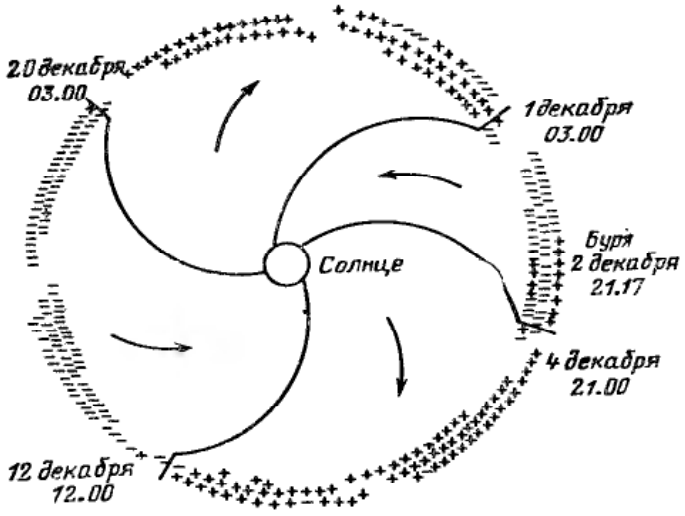


Рис. 45.16. Секторная структура межпланетного магнитного поля в плоскости эклиптики:

знак плюс показывает поле, направленное от Солнца, знак минус — поле, направленное к Солнцу [18]

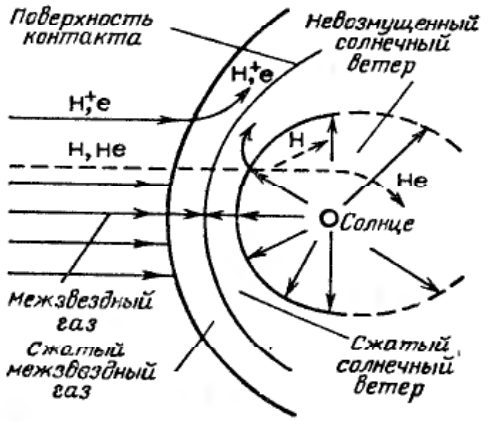


Рис. 45.17. Взаимодействие между солнечным ветром и межзвездной средой:

сплошные линии — траектории протонов и электронов межзвездного газа, пунктир — траектории нейтральных атомов, жирные линии — внешняя и внутренняя ударные волны [19]

45.4. ЗВЕЗДЫ

Основные типы спектральных классов приведены в табл. 45.13.

Таблица 45.13. **Спектральная классификация звезд [1—3]**

Спектральный класс	Характеристики класса	Поверхностная температура, К	Цвет авезды ($B-V$)
O	Горячие звезды с линиями поглощения He II	30 000—50 000	Голубой ($-0{,}3^m$)
B	Линии поглощения He I (линии H усиливаются к классу A)	12 000—30 000	Голубовато-белый ($0{,}0-0{,}3^m$)
A	Линии H достигают наибольшей интенсивности и затем ослабевают; усиливаются линии Ca II	7600—11 000	Белый ($0{,}2-0{,}0^m$)
F	Линии Ca II усиливаются, линии H ослабевают; развиваются линии металлов	7600—6000	Желто-белый ($0{,}6-0{,}3^m$)
G	Сильные линии Ca II и других металлов; линии H ослабевают	5000—6000	Желтый ($0{,}8-0{,}6^m$)
K	Сильные линии металлов; появляются полосы поглощения CH и CN	4000—5000	Оранжевый ($1{,}4-0{,}8^m$)
M	Сильные полосы TiO	2500—4000	Красный ($2{,}0-1{,}4^m$)

Каждый спектральный класс делится на 10 подклассов, обозначаемых цифрами от 0 до 9 (в сторону уменьшения температуры), которые ставятся после буквы. После обозначения спектрального класса римской цифрой указывается класс светимости звезды: I — сверхгиганты, II — яркие гиганты, III — гиганты, IV — субгиганты, V — главная последовательность, VI — субкарлики, VII — белые карлики (табл. 45.14, 45.15).

Кроме перечисленных выделяют дополнительные спектральные классы:

S — звезды, отличающиеся наличием в спектре полос поглощения ZrO, по физическим характеристикам соответствуют классу K;

N и R — звезды, отличающиеся наличием в спектре полос поглощения молекулярных соединений углерода, окиси углерода и циана; соответствуют соответственно основным спектральным классам K и G;

Таблица 45.14. **Характеристики звезд различных спектральных классов [2]**

Звезда	Спектральный класс и класс светимости	Эффективная температура, K	Светимость, $L_\odot$	Радиус, $R_\odot$	Масса, $M_\odot$
α Скорпиона A (Антарес)	M0I	3300	34 000	530	19
α Волопаса (Арктур)	K2III	4000	130	26	4,2
η Ориона	B1V	23 000	13 000	7,2	13,7
α Большого Пса A (Сириус A)	A1V	9700	61	2,4	3,3
Звезда Барнарда	M5V	3000	0,015	0,50	0,38
α Большого Пса B (Сириус B)	A5VII	8200	$2{,}6\cdot10^{-3}$	$2{,}6\cdot10^{-2}$	0,96

Таблица 45.15. **Характеристики некоторых ярких звезд [1]**

Звезда	Видимая визуальная звездная величина	Абсолютная визуальная звездная величина	Спектральный класс и класс светимости	Расстояние, пк
Полярная (α Малой Медведицы)	2,3*	—4,6	F8I	240
Ахернар (α Эридана)	0,48	—2,2	B5IV—V	39
Алголь (β Персея)	2,2*	—0,3	B8V	32
Альдебаран (α Тельца)	0,85	—0,7	K5III	21
Капелла (α Возничего)	0,08	—0,6	G8+F	14
Ригель (β Ориона)	0,11	—7,0	B8I	250
Бетельгейзе (α Ориона)	0,8*	—6	M2I	200
Канопус (α Киля)	—0,73	—4,7	F0I	60
Сириус (α Большого Пса)	—1,45	1,41	A1V	2,7
Процион (α Малого Пса)	0.35	2,65	F5IV	3,5
Спика (α Девы)	0,96	—3,4	B1V	80
α Центавра	—0,1	4,3	G2V	1,33
Арктур (α Волопаса)	—0,06*	—0,2	K2*p*III	11
Антарес (α Скорпиона)	1,0	—4,7	M1I	130
Вега (α Лиры)	0,04	0,5	A0V	8,1
Альтаир (α Орла)	0,77	2,3	A7V	5,0

* Переменная звезда.

Q — новые звезды;
W — звезды Вольфа — Райе — горячие звезды с широкими эмиссионными линиями.

Диаграмма Герцшпрунга — Рессела [21] (рис. 45.18) связывает светимости и спектральные классы звезд. Каждому типу звезд на диаграмме соответствует своя зона. Наиболее многочисленный тип звезд принадлежит *главной последовательности*. Это звезды, источником энергии которых служат термоядерные реакции H⟶He. Минимальная масса, необходимая для того, чтобы в недрах звезды начались термоядерные реакции, равна 0,085 $M_\odot$ [22]. В звездах массой $M \leqslant M_\odot$ основной реакцией является *pp*-цикл (см. гл. 39). В условиях звездных недр скорость энерговыделения, Вт/кг, при *pp*-реакции равна

$$\varepsilon_{pp} = 2{,}50\, \rho X^2 T_6^{-2/3} \exp\left(-33{,}8\, T_6^{-1/3}\right),$$

где ρ — плотность, г/см; X — массовая доля водорода; T_6 — температура вещества, 10^6 К. В звездах массой $M > M_\odot$ основным источником энергии служит двойной CNO-цикл (см. гл. 39), для которого скорость энерговыделения

$$\varepsilon_{CNO} = 9{,}5 \cdot 10^{24}\, \rho X X_{CN} T_6^{-2/3} \exp(-152{,}3\, T_6^{-1/3}),$$

где X_{CN} — массовая доля углерода и азота.

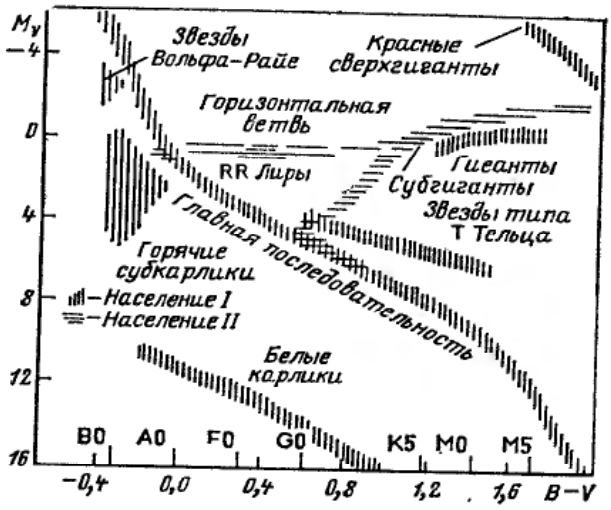


Рис. 45.18. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела [2]

После выгорания водорода в ядре начинается горение водорода в окружающем ядро слое, а затем последовательное горение гелия, углерода и других элементов. На этих стадиях происходит увеличение размеров и светимости звезды, в результате чего она перемещается по диаграмме Герцшпрунга — Рессела вправо и вверх. В области *красных гигантов* находятся звезды со слоевым источником энергии. На *горизонтальную ветвь* попадают звезды умеренных масс (около $M_\odot$), в ядре которых горит гелий. На поздних стадиях эволюции звезды интенсивно теряют массу. После истощения всех источников термоядерной энергии звездный остаток в зависимости от его массы превращается в белый карлик, нейтронную звезду или черную дыру.

Характеристики звезд различных типов приведены в табл. 45.16 и на рис. 45.19, 45.20.

Двойные и кратные звезды. На 100 звездных систем приходится 30 одиночных звезд, 47 двойных систем (94 компонента) и 23 кратные системы (81 компонент) [1].

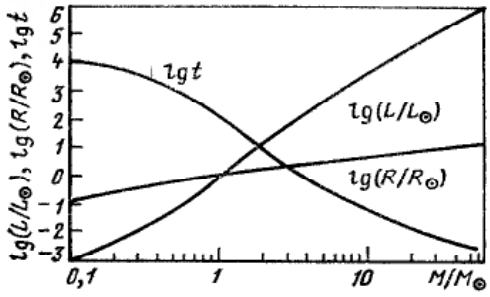


Рис. 45.19. Зависимость светимости L и радиуса R звезды главной последовательности от ее массы. Здесь же приведено время t, 10^9 лет, пребывания звезды на главной последовательности [1]

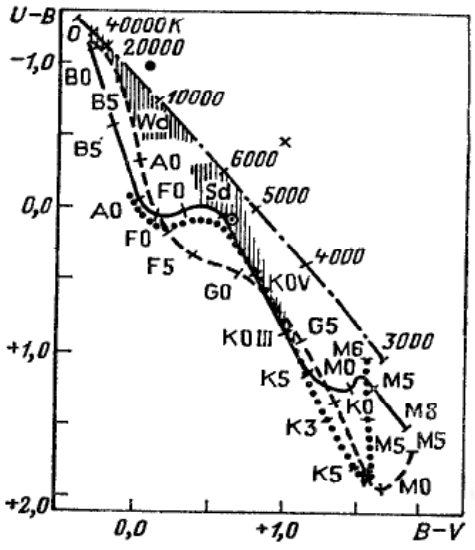


Рис. 45.20. Связь между показателями цвета U—B и B—V для звезд главной последовательности (сплошная линия), сверхгигантов (пунктир), гигантов (точки). Заштрихованы области, занимаемые белыми карликами (Wd) и субкарликами (Sd). Штрихпунктирная линия соответствует излучению черного тела. Показано положение Солнца (⊙), квазара 3C273 (●), рентгеновского источника Лебедь X-1 (×) [3]

Переменные звезды. Кроме *затменных переменных* звезд, которые представляют собой двойные системы, изменяющие свой блеск вследствие периодических затмений одного компонента другим, имеются различные типы физических переменных звезд. Среди них наиболее многочисленны *пульсирующие звезды* (табл. 45.17).

Для классических цефеид существует соотношение период — светимость [2]:

$$M_V = -1{,}67 - 2{,}54 \lg P, \quad M_B = -1{,}33 - 2{,}25 \lg P,$$

где M_V и M_B — абсолютные звездные величины соответственно в визуальной и голубой областях спектра; P — период, сут. Эта зависимость используется для определения расстояний до близких галактик.

Катаклизмические переменные [24, 25] (табл. 45.18) представляют собой тесные двойные системы (орбитальный период 1—10 ч), один из компонентов кото-

Таблица 45.16. **Масса, радиус, светимость и средняя плотность в зависимости от спектрального класса звезды [1] (СГ — сверхгигаит, Г — гигаит, ГП — главиая последовательность)**

Спектральный класс	$\lg (M/M_\odot)$			$\lg (R/R_\odot)$			$\lg (L/L_\odot)$			$\lg \overline{\rho}$ [г/см³]		
	СГ	Г	ГП	СГ	Г	ГП	СГ	Г	ГП	СГ	Г	ГП
O5	+2,2	—	+1,6	—	—	+1,25	—	—	+5,7	—	—	—2,0
B0	+1,7	—	+1,25	+1,3	+1,2	+0,87	+5,4	—	+4,3	—2,1	—	—1,2
B5	+1,4	—	+0,81	+1,5	+1,0	+0,58	+4,8	—	+2,9	—2,9	—	—0,78
A0	+1,2	—	+0,51	+1,6	+0,8	+0,40	+4,3	—	+1,2	—3,5	—	—0,55
A5	+1,1	—	+0,32	+1,7	—	+0,24	+4,0	—	+1,3	—3.8	—	—0,26
F0	+1,1	—	+0,23	+1,8	—	+0,13	+3,9	—	+0,8	—4,2	—	—0,01
F5	+1,0	—	+0,11	+1,9	+0,6	+0,08	+3,8	—	+0,4	—4,5	—	+0,03
G0	+1,0	+0,4	+0,04	+2,0	+0,8	+0,02	+3,8	+1,5	+0,1	—4,9	—1,8	+0,13
G5	+1,1	+0,5	—0,03	+2,1	+1,0	—0,03	+3,8	+1,7	—0,1	—5,2	—2,4	+0,20
K0	+1,1	+0,6	—0,11	+2,3	+1,2	—0,07	+3,9	+1,9	—0,4	—5,7	—2,9	+0,25
K5	+1,2	+0,7	—0,16	+2,6	+1,4	—0,13	+4,2	+2,3	—0,8	—6,4	—3,4	+0,38
M0	+1,2	+0,8	—0,33	+2,7	—	—0,20	+4,5	+2,6	—1,2	—6,7	—4	+0.4
M2	+1,3	—	—0,41	+2,9	—	—0,3	+4,7	+2,8	—1,5	—7,2	—	+0,7
M5	—	—	—0,67	—	—	—0,5	—	+3,0	—2,1	—	—	+1,0
M8	—	—	—1,0	—	—	—0,9	—	—	—3,1	—	—	+1,8

Таблица 45.17. **Пульсирующие перемеиные [23]**

Тип звезды	Период	Характерный период	Население	Спектральный класс	Абсолютная звездная величина
RR Лиры	1,5—24 ч	0,5 сут	II	A2— F2	0,0—1,0 ^{m}
Классические цефеиды	1—50 сут	5—10 сут	I	F6 — K2	—0,5÷—6^m
W Девы	2—45 сут	12—20 сут	II	F2 — G6 (?)	0÷—3^m
RV Тельца	20—150 сут	75 сут	II	G, K	—3^m
Красные полуправильные переменные	100—200 сут	100 сут	I и II	(K), M, R, N, S	—1÷—3^m
Долгопериодические переменные	100—700 сут	270 сут	I и II	Me, Re, Ne, Se	+1÷—2^m
Типа β Цефея (β Большого Пса)	4—6 ч	5 ч	I	B1 — B2	—3,5÷—4,5^m
Карликовые цефеиды и переменные типа δ Щита	1—3 ч	2 ч	I	A2 — F5	+2÷+3^m
Цефеиды с биениями (двупериодические цефеиды)	1—7 сут	2 сут	I (?)	F0 — G0 (?)	—1÷—3^m (?)
Переменные белые карликн (звезды типа ZZ Кита)	200—1000 с	500 с (?)	I (?)	A5 — F5 (?)	+10÷+15^m (?)

Таблица 45.18. **Типы катаклизмических перемеиных**

Тип	Амплитуда изменения звездной величины при вспышке	Светимость в максимуме, Вт	Полная энергия вспышки, Дж	Длительность вспышки, сут	Время между вспышками
Классические новые	9—>14^m	10^{31}	10^{38}—10^{39}	50—5000	~10^3 лет
Повторные новые	7—9^m	10^{31}	10^{35}—10^{36}	10—100	10—100 лет
Карликовые новые:					
типа U Близнецов	2—6^m	10^{27}	10^{31}—10^{32}	10	15—500 сут
типа Z Жирафа	2—5^m	10^{28}	10^{31}—10^{33}	10	10—50 сут

Таблица 45.19. **Некоторые новые звезды [1]**

Звезда	Год вспышки	Звездная величина			Абсолютная звездная величина в максимуме	t_3*, сут	Орбитальный период [26]
		до вспышки	в максимуме	после вспышки			
T Возничего	1891	>13	4,0	14,8	—6,2	120	4 ч 20 мин
GK Персея	1901	13,5	0,2	13,2	—8,3	12	45 ч 20 мин
V 603 Орла	1918	10,6	—1,1	10,9	—8,4	7	3 ч 20 мин
DQ Геркулеса	1934	14,3	1,4	13,8	—6,2	105	4 ч 39 мин

* t_3 — время уменьшения блеска после максимума на 3^m.

Таблица 45.20. **Некоторые повторные новые звезды [1]**

Звезда	Годы вспышек	Звездная величина		Абсолютная звездная величина в максимуме	t_3, сут	Орбитальный период [26]
		в максимуме	в минимуме			
T Северной Короны	1866, 1946	2,1	10,6	—8,1	6	230 сут
RS Змееносца	1898, 1933, 1958	4,3	11,6	—8,5	10	—
WZ Стрелы	1913, 1946	7,3	15,9	—7.1	33	81,5 мин
U Скорпиона	1966, 1906, 1936	8,9	17,6	—7,6	6	—

рых является белый карлик, а другим — нормальная звезда. В результате неустойчивости, развивающейся при аккреции (перетекании вещества с нормальной звезды на белый карлик), происходят вспышки оптического излучения. В случае классических новых звезд это тепловая неустойчивость, которая приводит к термоядерному взрыву водорода, накопившегося в результате аккреции на поверхности белого карлика. Катаклизмические переменные представляют собой рентгеновские источники (светимость 10^{24}—10^{26} Вт в спокойном состоянии).

Характеристики некоторых катаклизмических переменных приведены в табл. 45.19, 45.20.

К другим типам переменных звезд относятся следующие звезды.

Звезды типа T *Тельца* [27, 28] — звезды массой 0,5—3 $M_\odot$, еще не вышедшие на стадию главной последовательности. Они испытывают нерегулярные колебания блеска амплитудой до нескольких звездных величин. Относятся к спектральным классам от M до G с сильными эмиссионными линиями. Светимости составляют 0,3—30 $L_\odot$. Скорость потери массы 10^{-7}—$10^{-9} M_\odot$/год.

Звезды типа UV *Кита* [1, 29] — вспыхивающие карликовые звезды спектрального класса M массой 0,1—0,5 $M_\odot$. Вспышки происходят нерегулярно с характерной частотой около 1 сут$^{-1}$. Время нарастания блеска — примерно 1 мин, длительность вспышки — около 20 мин, полная энергия вспышки — порядка 10^{25} Дж.

Таблица 45.21. **Характеристики некоторых радиопульсаров [36]**

Пульсар	Период P, с	Время замедления $P/\dot{P}$, 10^6 лет	Эквивалентная ширина импульса на частоте 400 МГц*1, мс	Плотность потока на частоте 400 МГц. Ян	Расстояние, кпк	Мера дисперсии, пк/см^3	Скорость потери энергии*2, 10^{25} Вт	Примечание
PSR 1937+24 [35]	$1{,}5578\cdot10^{-3}$	150	0,125*3	—	2,5	—	40	—
PSR 0531+21 (пульсар в Крабовидной туманности)	0,0332	0,0024	1,9	480	2,0	56,7	4600	Наблюдается пульсирующее излучение в оптическом, рентгеновском и γ-диапазонах
PSR 1913+16	0,0590	212	10	12	6,1	167	$2\cdot10^{-2}$	Входит в состав тесной двойной системы, $P_{орб}$ = 27906,98 с
PSR 0833—45 (пульсар в созвездии Паруса)	0,0892	0,022	1,7	5000	0,5	69,0	67	Наблюдается пульсирующее излучение в оптическом и γ-диапазонах
PSR 1952+29	0,4266	8600	13	20	0,8	20	$5\cdot10^{-6}$	—
PSR 1919+21	1,3373	32	25	56	0,5	12,4	$2\cdot10^{-4}$	—
PSR 1845—19	4,3081	5,8	66	15	0,7	19,1	10^{-4}	—

*1 Энергия импульса, отнесенная к максимальной плотности потока.

*2 Скорость потери энергии вращения $I\Omega\dot{\Omega}$, рассчитанная для характерного значения момента инерции нейтронной звезды $I = 10^3$ кг · м^2.

*3 Ширина импульса на полувысоте.

Звезды типа R *Северной Короны* [1] — сверхгиганты спектральных классов F—K и R, испытывающие непериодические уменьшения блеска на $1—9^m$ продолжительностью десятки и сотни дней.

Симбиотические звезды [30] — тесные двойные системы, состоящие из холодной и горячей звезд. Хаотически изменяют свой блеск на $1—3^m$ за время порядка года (иногда — десятков лет).

Пекулярные звезды [3]. Перечислим некоторые из них.

Звезды Вольфа — Райе — звезды высокой светимости (порядка $10^6\ L_\odot$) с очень яркими и широкими эмиссионными линиями, отличаются присутствием в спектрах одновременно линий высокоионизованных ионов ($T \approx 10^5$ K) и сравнительно низкотемпературного континуума [$T \approx (1 \div 2) \cdot 10^4$ K]. Представляют собой массивные (около 10 $M_\odot$) звезды на конечных стадиях эволюции, интенсивно теряющие массу ($10^{-4}—10^{-5}\ M_\odot$ в год) в виде мощного звездного ветра. Известно около 300 таких объектов в нашей и соседних галактиках.

Магнитные звезды обладают очень высокими ($10^{-2}—1$ Тл) магнитными полями. Все звезды этого типа отличаются аномальным химическим составом (по-видимому, только во внешних областях): занижено содержание гелия, тогда как содержание тяжелых элементов (Si, Cr, Mn, Sr, Eu, Gd и других) аномально велико. Избыток в среднем растет с увеличением атомного номера элемента, достигая $10^4—10^6$ для редкоземельных элементов. Магнитные звезды лежат на главной последовательности в интервале спектральных классов B—F. К ним принадлежит 10—15% звезд этой части диаграммы.

Сверхновые звезды [31]. Вспышка сверхновой происходит в результате коллапса звезды, в которой истощились запасы ядерного топлива. При этом выделяется энергия порядка 10^{44} Дж и значительная часть массы звезды выбрасывается в виде оболочки, расширяющейся со скоростью 10 000—20 000 км/с. Светимость в максимуме $10^{35}—10^{37}$ Вт (рис. 45.21). Частота вспышек сверхновых в Галактике составляет примерно 0,05 год$^{-1}$.

Конечные стадии эволюции звезд [33]. Конечное состояние звезды после истощения ядерного топлива и сброса массы в ходе эволюции либо при вспышке сверхновой зависит от массы коллапсирующего остатка. *Белые карлики* представляют собой звезды, в которых сила тяжести уравновешивается давлением вырожденного электронного газа. Их излучение обеспечивается тепловой энергией, запасенной в их недрах. Масса белого карлика не может превысить значение (предел Чандрасекара) $M = 1{,}46\ (2/\mu)^2\ M_\odot$, где $\mu = A/Z$ — молекулярная масса на электрон (для элементов в интервале He—Fe $\mu \approx 2$). Радиусы белых карликов составляют $10^6—10^7$ м (рис. 45.22), светимости — $(10^{-2}—10^{-4})\ L_\odot$, центральные плотности — порядка 10^9 кг/м^3. Зеемановское расщепление линий свидетельствует о наличии у ряда белых карликов магнитных полей с $B = 10^2 \div 10^3$ Тл.

В интервале масс $0{,}1\ M_\odot < M < (2 \div 3)\ M_\odot$ равновесным состоянием является нейтронная звезда (рис. 45.23). Характерные параметры нейтронных звезд: радиус — около 10 км, B — до $10^6—10^9$ Тл, гравитаци-

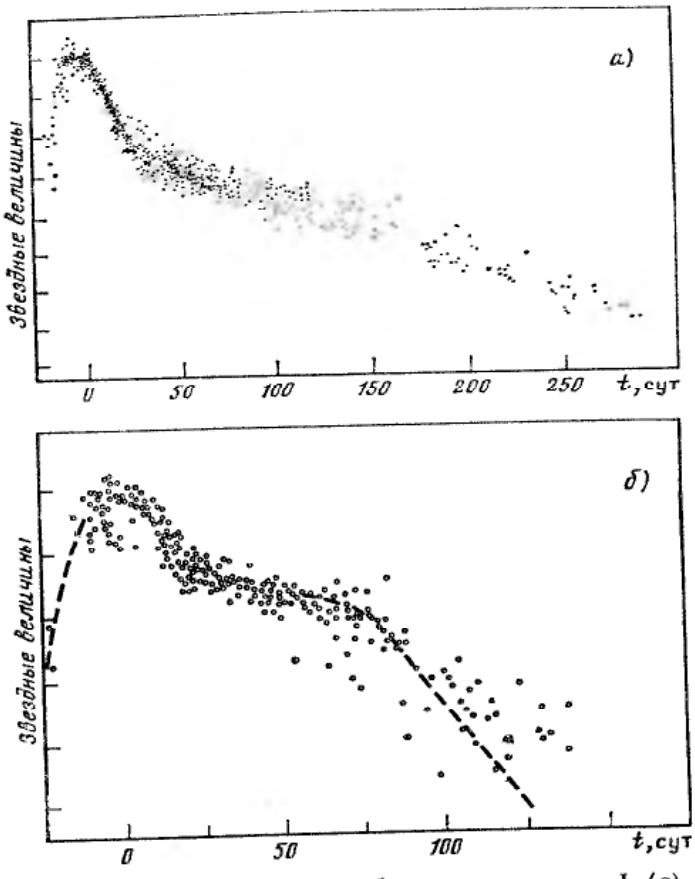


Рис. 45.21. Сводные кривые блеска сверхновых I (*а*) и II (*б*) типов [32]

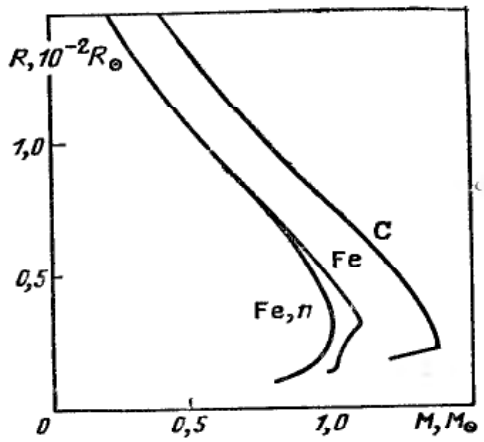


Рис. 45.22. Зависимость радиуса белого карлика от его массы. Приведены результаты расчетов для белых карликов, состоящих из углерода, железа и железа с учетом нейтронизации [34]

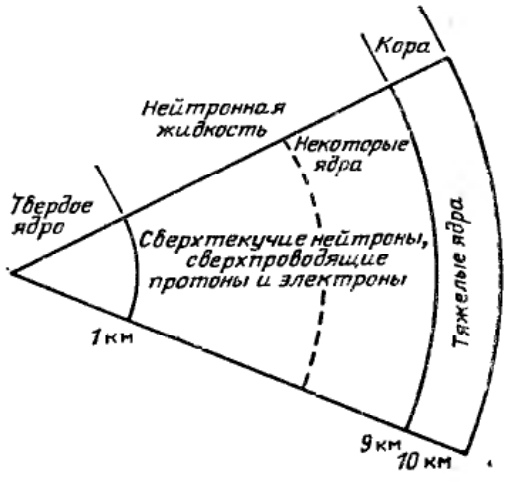


Рис. 45.23. Примерная схема строения нейтронной звезды [35]

онное красное смещение на поверхности $\Delta\lambda/\lambda \approx 10\%$, плотность в центре 10^{17}—10^{19} кг/м^3, момент инерции — порядка 10^{38} кг·м^2. Верхняя граница массы нейтронных звезд определяется неизвестным уравнением состояния вещества при сверхвысоких плотностях, но она заведомо не превосходит 3,2 $M_\odot$. Звездные остатки большей массы неизбежно коллапсируют в *черные дыры*.

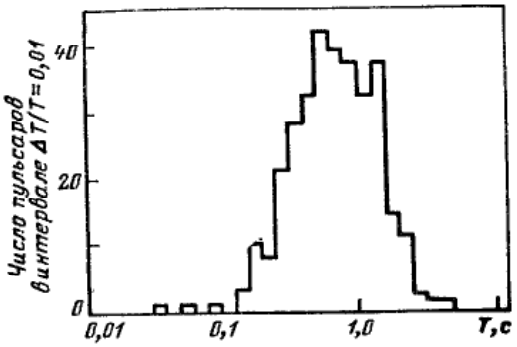


Рис. 45.24. Распределение периодов радиопульсаров [36]

Вращающиеся нейтронные звезды с сверхсильными магнитными полями могут проявлять себя как *радиопульсары* [35, 36] — мощные источники строго периодических импульсов радиоизлучения, период которых совпадает с периодом вращения нейтронной звезды (табл. 45.21). Радиоизлучение имеет степенной спектр (рис. 45.24). Источником энергии пульсара является энергия вращения нейтронной звезды, поэтому периоды всех пульсаров увеличиваются. Известно свыше 400 пульсаров.

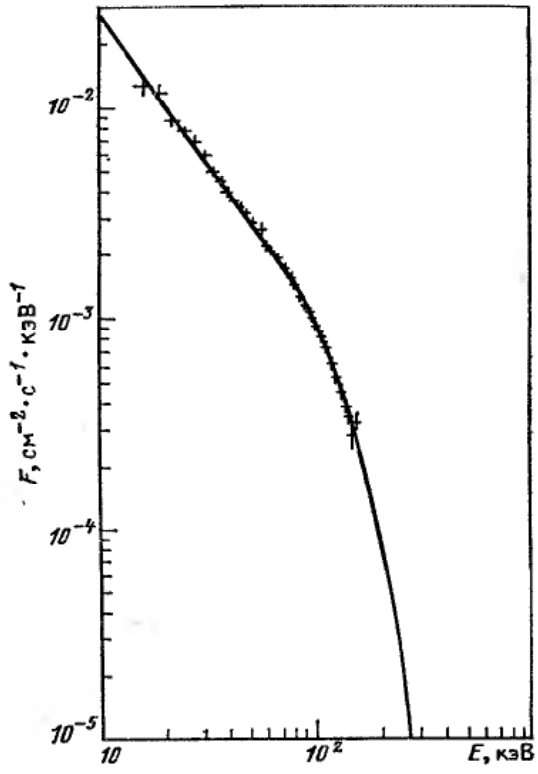


Рис. 45.25. Спектр рентгеновского излучения кандидата в черные дыры источника Лебедь X-1:
сплошная кривая — спектр излучения слоя плазмы с температурой $T=27$ кэВ и оптической полутолщиной по томсоновскому рассеянию $\tau=2$ [42]

Компактные звезды, входящие в состав тесных двойных систем, могут проявлять себя как *рентгеновские источники* [33]. Источником энергии служит аккреция вещества, перетекающего с нормальной звезды на компактную. Светимость аккрецирующих источников L, Вт, связана со скоростью аккреции $\dot{m}$, 10^{-8} $M_\odot$/год, соотношением

$$L = 6 \cdot 10^{31} \xi \dot{m}.$$

Для белых карликов $\xi \approx 10^{-4}$, для нейтронных звезд $\xi = 0{,}1 \div 0{,}2$, для черных дыр при дисковой аккреции

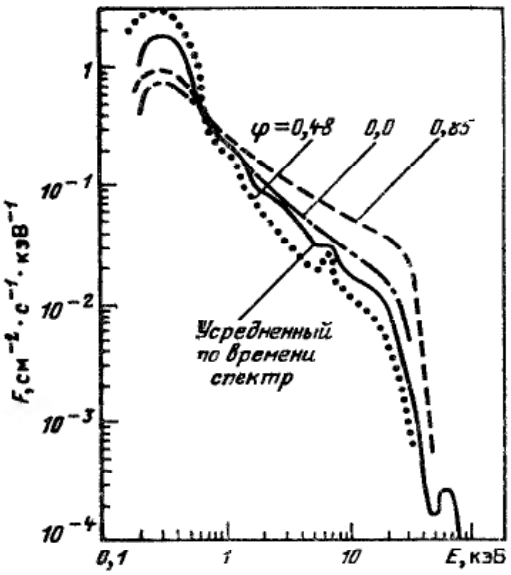


Рис. 45.26. Спектр излучения рентгеновского пульсара Геркулес X-1 в различных фазах Ф периода пульсаций. Спектральная особенность вблизи $E=7$ кэВ—результат флуоресценции железа. Особенность вблизи $E=50$ кэВ соответствует циклотронной частоте электронов в магнитном поле с $B=5 \cdot 10^8$ Тл [43]

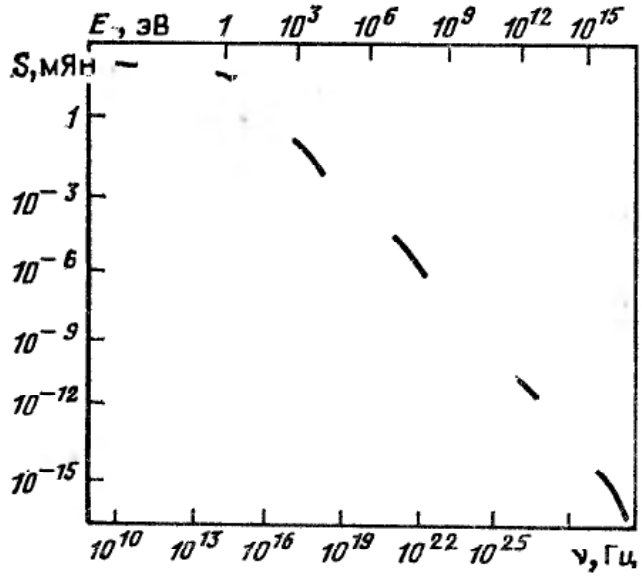


Рис. 45.27. Спектр излучения Лебедь X-3. Источник проявляет активность во всех диапазонах электромагнитных волн от радио- до γ-излучения сверхвысоких энергий. Входит в состав тесной двойной системы (орбитальный период 4,8 ч), находящейся на расстоянии 10 кпк [45]

Таблица 45.22. **Рентгеновские источники — кандидаты в черные дыры**

Источник	Рентгеновская светимость, 10^{30} Вт	Масса, $M_\odot$	Нормальная звезда двойной системы	Орбитальный период двойной системы, сут	Расстояние, кпк
Лебедь X-1 [38]	4—6	8—11	O9,7 I	5,6	2,5
LMC X-1 [39]	20	>3	O7	3,9	50
LMC X-3 [39]	20	7—14	B3	1,7	50

Таблица 45.23. **Характеристики некоторых рентгеновских пульсаров [40, 41]**

Источник	Рентгеновская светимость, 10^{30} Вт	Период пульсаций P, с	Относительная скорость изменения периода $\dot{P}/P$, лет$^{-1}$	Орбитальный период двойной системы, сут	Расстояние, кпк
SMC X-1	50	0,71	$-6\cdot10^{-4}$	3,89	50
Геркулес X-1	2,5	1,24	$-3\cdot10^{-6}$	1,7	5
Центавр X-3	8—16	4,84	$-3\cdot10^{-4}$	2,087	8
X Персея	$4\cdot10^4$	835	$-2\cdot10^{-4}$	>40	0,35
Парус X-1	0,8—0,25	283	$-2\cdot10^{-5}$	8,97	1,4

$\xi\approx0{,}06\div0{,}4$ (в зависимости от момента вращения черной дыры). Полной классификации рентгеновских источников нет. Выделяют отдельные типы источников.

При аккреции на нейтронную звезду с $B>10^6$ Тл вещество падает в район магнитных полюсов. Рентгеновское излучение нейтронной звезды модулируется ее вращением вокруг оси. Такие источники называют *рентгеновскими пульсарами*. Известно 20 рентгеновских пульсаров с периодами 0,1—1000 с.

Барстеры — рентгеновские источники, в которых на фоне стационарного рентгеновского излучения со светимостью порядка 10^{29} Вт непериодически с интервалом от нескольких часов до суток происходят всплески излучения. Время нарастания всплеска — около 1 с, время затухания — от 3 до 100 с, светимость в максимуме — порядка 10^{31} Вт. Известно около 30 таких источников. Всплески происходят в результате термоядерных взрывов вещества, накопившегося при аккреции на поверхности нейтронной звезды.

Транзиентные (новоподобные) источники — системы, в которых аккреция происходит не постоянно; в результате источник то появляется, то исчезает с интервалом от нескольких месяцев до нескольких лет. Это может быть связано с эллиптичностью орбиты релятивистской звезды в двойной системе или с пульсациями нормальной звезды, что приводит к сильным колебаниям скорости аккреции. Среди транзиентных источников есть рентгеновские пульсары и барстеры.

В табл. 45.22, 45.23 приведены параметры некоторых рентгеновских источников, а на рис. 45.25—45.27— характерные спектры.

Космические γ-всплески характеризуются следующими параметрами [44] (см. также рис. 45.28):

энергия, регистрируемая за весь всплеск, $3\cdot10^{-9}$—$1{,}5\cdot10^{-5}$ Дж/м^2;

плотность потока энергии в максимуме $5\cdot10^{-8}$—$4\cdot10^{-7}$ Дж/(м$^2\cdot$с);

длительность всплесков 0,1—100 с;

число отдельных пиков во всплеске 1—5, иногда больше;

время нарастания первого импульса 10^{-5}—3 с.

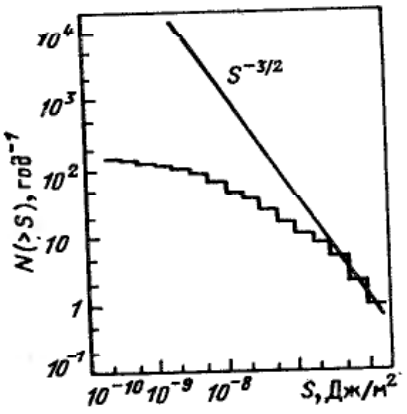


Рис. 45.28. Распределение частоты N появления γ-всплесков, интенсивность которых превосходит S: жирная прямая соответствует закону $N(>S)\propto S^{-3/2}$, который наблюдался бы, если бы источники всплесков были распределены в пространстве однородно и изотропно [44]

45.5. НАША ГАЛАКТИКА

Параметры Галактики [1, 3, 46, 47]. Наша Галактика представляет собой светящийся диск из звезд. Принадлежит к классу спиральных. В центре диска имеется утолщение — балдж, внутри которого находится компактное ядро Галактики. В диске выделяют плоскую составляющую — тонкий слой межзвездного газа и образующихся из него молодых звезд. Диск окружен сфероидальным гало из слабосветящихся старых звезд. Из динамических соображений [анализ кривой вращения (рис. 45.29) и устойчивости] следует, что Галактика должна быть окружена короной, содержащей основную часть массы системы. Непосредственно корона не наблюдается, поэтому она должна состоять из темной материи [маломассивные звезды низкой светимости, «мертвые» звездные остатки, нейтрино с ненулевой массой покоя (?)].

Ниже приведены параметры Галактики (см. также рис. 45.30—45.36, табл. 45.24):

полная светимость $5\cdot10^{36}$ Вт;

величина которых меньше $16{,}5^m$, $(6\div8)\cdot10^{10}$;

количество звезд, абсолютная визуальная звездная

период обращения Солнца вокруг ядра Галактика $2{,}5\cdot10^8$ лет;

возраст — примерно 10^{10} лет;

плотность энергии в диске Галактики;

излучения звезд $0{,}7\cdot10^{-13}$ Вт/м^3;

турбулентных движений газа $0{,}5\cdot10^{-13}$ Дж/м^3;

реликтового излучения $0{,}4\cdot10^{-13}$ Дж/м^3;

космических лучей $1{,}6\cdot10^{-13}$ Дж/м^3;

магнитного поля примерно 10^{-13} Дж/м^3;

суммарная плотность вещества в центральной плоскости Галактики в окрестностях Солнца, определяемая по теореме вириала [48], 0,14 $M_\odot$/пк^3=$8{,}8\times10^{-21}$ кг/м^3;

плотность наблюдаемой звездной материи в окрестностях Солнца 0,046 $M_\odot$/пк^3=$3{,}0\cdot10^{-21}$ кг/м^3;

плотность межзвездного газа в окрестностях Солнца 0,03 $M_\odot$/пк^3=$1{,}2\cdot10^{-21}$ кг/м^3.

Типы звездных населений [1, 3]. Звезды и другие объекты в Галактике делятся на два типа. К населению I относятся объекты, образующие плоскую подсистему

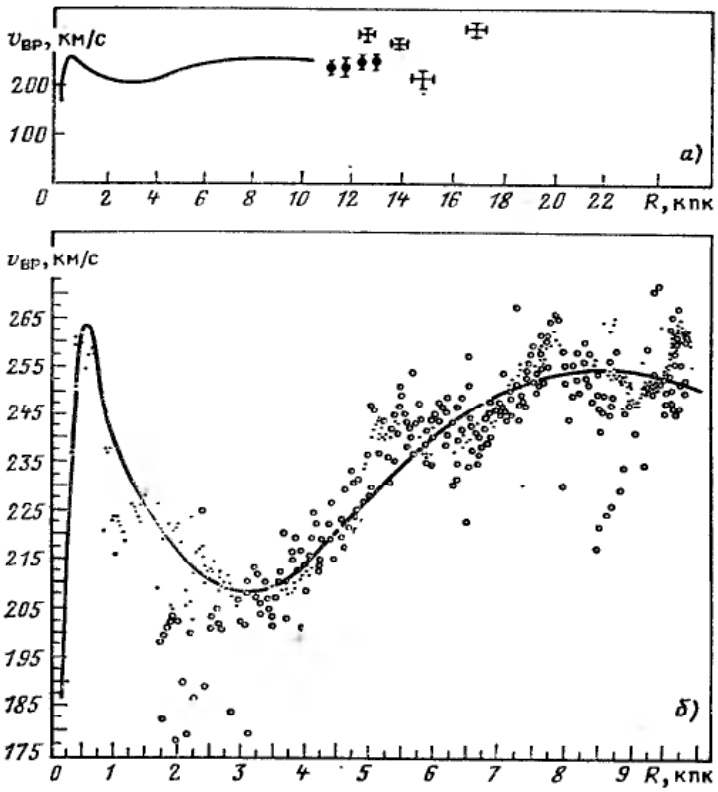


Рис. 45.29. Кривая вращения Галактики [46] (*а*) (*б* — более детальный масштаб)

Галактики: звезды в диске Галактики, межзвездный газ и пыль, диффузные туманности, рассеянные скопления. Возраст объектов населения I не превышает 10 млрд. лет. Население II составляют старые звезды (возраст около 10 млрд. лет), имеющие сферическое пространственное распределение и характеризующиеся низкнм содержанием металлов и высокими пространственными скоростями. К населению II относятся шаровые скопления.

Звездные скопления [1, 3, 50, 51]. Полное число скоплений в Галактнке — около 20 000.

Таблица 45. 24. **Размеры a_0, масса M и сплюснутость ε (отношение полуосей) подсистем Галактики**

Подсистема	ε	a_0, кпк	M, $10^{10}\ M_\odot$
Ядро	0,6	0,005	0,009
Балдж	0,6	0,21	0,442
Диск*	0,1	4,62	7,68
	0,45	1,026	—0,379
Плоская*	0,02	6,4	1,0
	0.025	5,12	—0,64
Гало	0,3	1,9	1,2
Корона	1	75	110

* В плоской подсистеме и диске наблюдается понижение плотности в центральной части, поэтому для описания этих систем вводится дополнительная «отрицательная» масса.

Звездные ассоциации — группы из нескольких десятков или сотен молодых звезд. Имеют размер десятки парсек. Связаны с областями звездообразования. Выделяют О-ассоцнацин, в которых группируются горячие звезды спектральных классов О н В, и Т-ассоциацин, включающне переменные звезды типа Т Тельца. Известно около 70 О-ассоциаций и 25 Т-ассоцнаций.

Рассеянные звездные скопления (табл. 45.25) представляют собой группы из нескольких сотен или тысяч звезд. Их массы примерно равны $10^3\ M_\odot$, размеры 1—10 пк. Эти скопления принадлежат к населению I. Известно примерно 1000 рассеянных скоплений. Звездные ассоциацни и рассеянные скоплення имеют содер-

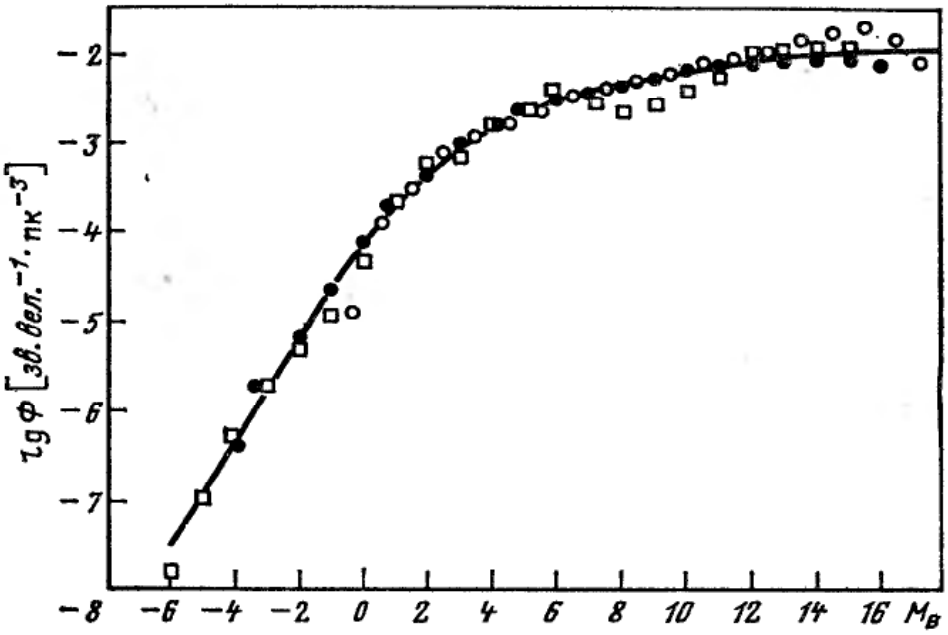


Рис. 45.30. Функция светнмостн звезд в Галактике $\Phi(M_B)$ (распределение звезд по абсолютным звездным величинам в полосе B [49]

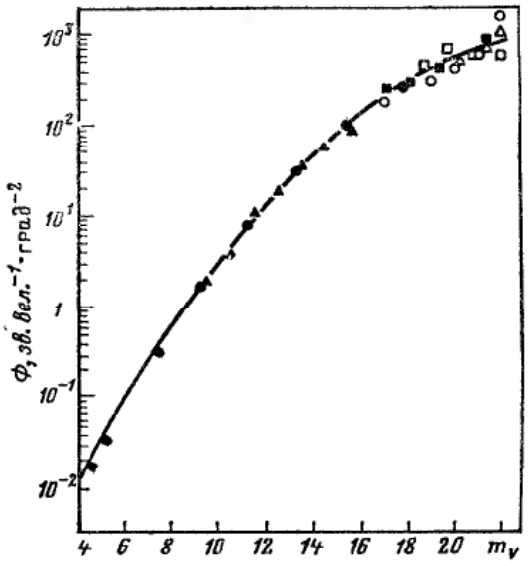


Рис. 45.31. Распределение звезд по визуальным звездным величинам в направлении на полюс Галактики [49]

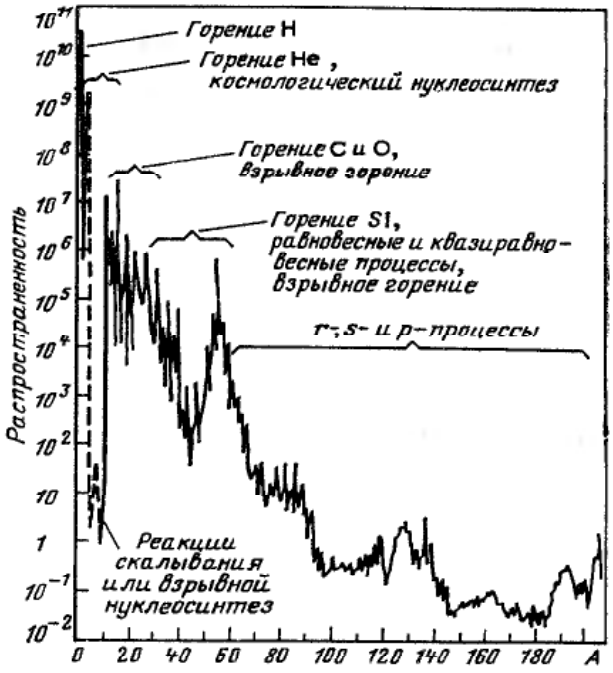


Рис. 45.32. Распространениость химических элементов: A — массовое число; указаны ядерные процессы в звездах, с которыми могут быть связаны особенности кривой распространенности [2]

жание тяжелых элементов, близкое к солнечному, и концентрируются к плоскости Галактики.

Шаровые скопления (табл. 45.26) представляют собой устойчивые образования, состоящие из 10^5—10^7 звезд. Общее число шаровых скоплений в Галактике — около 500. Их возраст 10—18 млрд. лет, а содержание тяжелых элементов в 10—100 раз меньше, чем на Солнце. Шаровые скопления образуют сфероидальную систему и концентрируются к центру Галактики.

Межзвездный газ [52, 53]. Внутри него выделяют следующие области (см. также табл. 45.27): 1) гигантские молекулярные облака (их насчитывается около 4000), в которых содержится почти половина массы все-

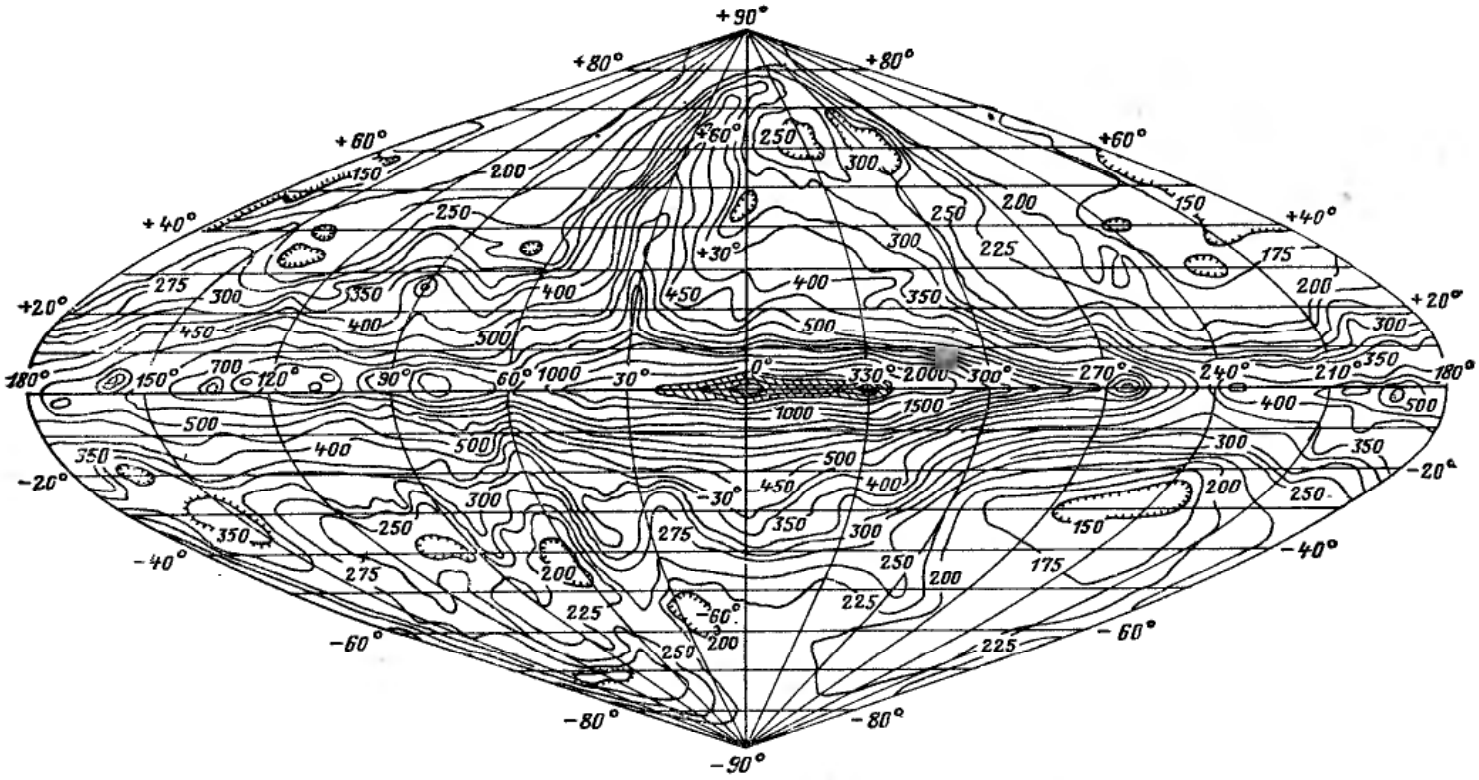


Рис. 45.33. Распределение яркости по небу на частоте 150 МГц в галактических координатах; цифры у изофот — яркостная температура излучения, К [54]

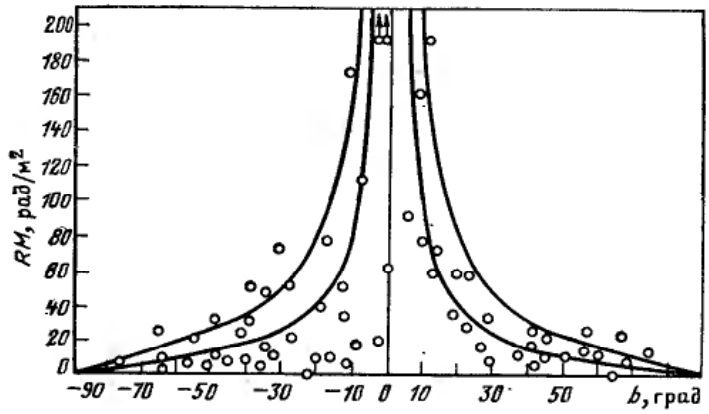


Рис. 45.34. Зависимость меры вращения RM внегалактических радионсточников от галактической широты. Фарадеевское вращение плоскости поляризации радиоизлучения $\Delta\Phi = RM\lambda^2$ позволяет определить величину $RM = 0{,}81 \int_0^l B_\parallel N_e\, dl$ рад/м², где $B_\parallel$ — составляющая магнитной индукции вдоль луча зрения, 10^{-10} Тл; N_e — плотность электронов, см$^{-3}$; l — расстояние до источника, пк [54]

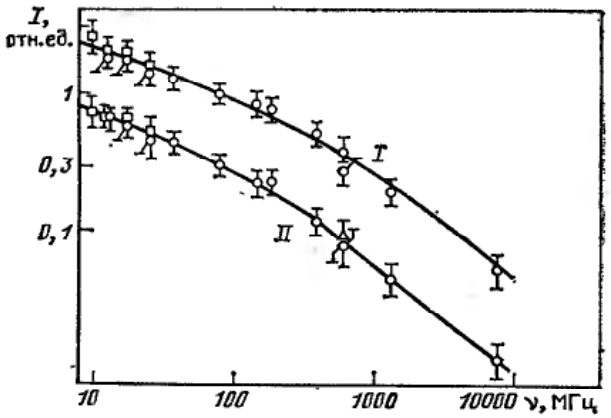


Рис. 45.35. Спектр радиоизлучения Галактики:
I — излучение высокоширотных областей в направлении на антицентр; *II* — излучение спиральных рукавов [54]

го газа; 2) области нейтрального водорода (HI); 3) зоны ионизованного водорода (HII), которыми являются эмиссионные туманности вокруг горячих звезд; 4) коридоры горячего разреженного газа (корональ ного газа). В среднем по диску Галактики плотность межзвездного газа составляет 0,5—0,7 см$^{-3}$. Толщина газового слоя 200—300 пк. К периферии Галактики (за пределами 12—15 кпк) она увеличивается и достигает нескольких килопарсек. Средняя концентрация электронов — примерно 0,03 см$^{-3}$. Основная часть газа сосредоточена в спиральных рукавах. Значительная его часть находится в молекулярном состоянии (табл. 45.28). Полная масса газа в Галактике составляет $(5 \div 10) \cdot 10^9\ M_\odot$. Масса нейтрального водорода, определяемая по излучению в линии с $\lambda = 21$ см, составляет $(2 \div 4) \cdot 10^9\ M_\odot$. Облака межзвездного газа помимо упорядоченного вращения вокруг центра Галактики движутся хаотически со скоростями около 10 км/с. Облака распределены по массам по закону: число облаков dN, масса которых лежит в интервале от M до $M+dM$, равно $dN \propto M^{-3/2} dM$. Межзвездное магнитное поле характеризуется индукцией $(2 \div 7) \cdot 10^{-10}$ Тл,

Таблица 45.25. Характеристики некоторых рассеянных скоплений

Скопление	Расстояние, пк	Нижний предел массы, $\lg (M/M_\odot)$	$\lg N_5^*$	Радиус ядра, пк	Радиус короны, пк	Возраст, 10^8 лет
Плеяды	134	2,6	2,2	2,6	8,1	0,5
Гнады	46	2,2	1,8	3,2	8,0	5
Ясли	174	2,5	2,0	2,8	6,9	5
M67	830	3,0	2,7	1,8	12,6	33

*N_5 — число звезд ярче 5^m.

Таблица 45.26. Характеристики некоторых шаровых скоплений

Скопление	Диаметр ядра, пк	Расстояние, кпк	Интегральная видимая звездная величина	Масса, $10^4\ M_\odot$
M5	12	8,5	5,9	6
M13	11	7,7	5,9	30
M92	10	10	6,5	14
M71	5	4,5	8,3	—

Таблица 45.27. Типичные параметры основных структурных компонентов межзвездного газа в спиральных ветвях Галактики [53]

Фаза	Температура, K	Плотность, см$^{-3}$	Масса, $M_\odot$	Размер, пк	Скважность (доля занимаемого объема)
Корональный газ	$\sim 5 \cdot 10^5$	$\sim 0{,}003$	—	—	$\sim 0{,}5$
Зоны HII низкой плотности	$\sim 10^4$	~ 3	—	—	$\sim 0{,}01$
Теплые области HI	$\sim 10^3$	~ 1	—	—	$\sim 0{,}01$
Межоблачная среда	$\sim 10^4$	$\sim 0{,}1$	—	—	$\sim 0{,}5$
Облака HI	~ 80	~ 10	~ 100	~ 10	$\sim 0{,}01$
Темные облака	~ 10	$\sim 10^3$	~ 300	~ 1	$\sim 10^{-5}$
Большие глобулы	~ 10	$\sim 10^4$	~ 20	$\sim 0{,}3$	$3 \cdot 10^{-9}$
Области HII	$\sim 10^4$	~ 30	~ 300	~ 10	$\sim 10^{-4}$
Гигантские молекулярные облака	~ 20	~ 300	$\sim 3 \cdot 10^5$	~ 40	$\sim 3 \cdot 10^{-4}$
Уплотнения в молекулярных облаках	~ 6	$\sim 10^5$	~ 100	$\sim 0{,}5$	—

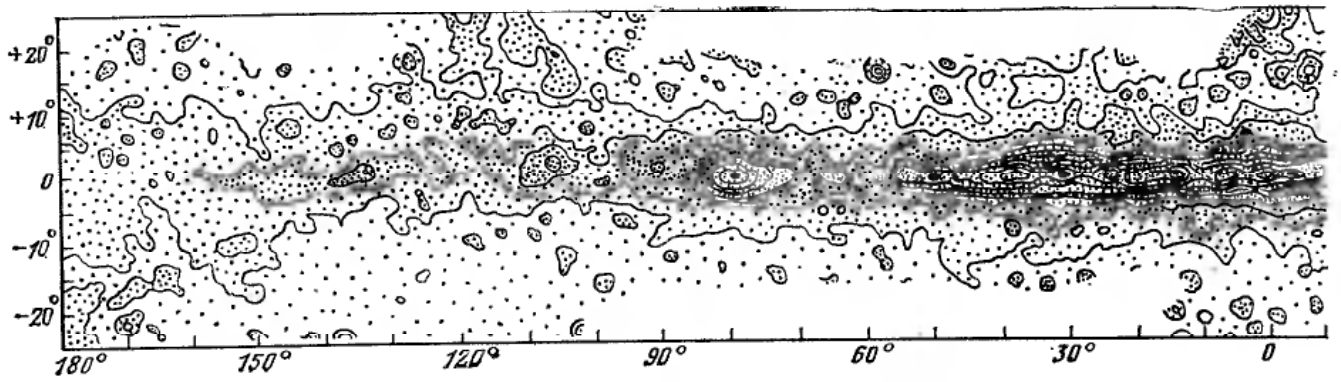


Рис. 45.36. Распределение γ-излучения (70 МэВ—5 ГэВ)

Межзвездный газ хорошо поглощает нонизирующее излучение. Это затрудняет наблюдения в ультрафиолетовом и длинноволновом рентгеновском диапазонах (рис. 45.37).

Таблица 45.28. **Некоторые межзвездные молекулы** [52, 55]

Молекула	Характерная длина волны, см	lg (N/N_H)
H_2	—	0
CH	9,6	—8
OH	18	—8
CN	0,27	—8
CO	0,26	—4
SiO	0,23	—7
CS	0,20	—7
SO	0,30	—7
	0,22	
SiS	0,33	—7
	0,27	
H_2O	1,4	—7
C_2H	0,34	—6
HCN	0,34	—6
H_2S	0,18	—8
OCS	0,25	—8
NH_3	1,3	—6
H_2CO	6,2	—8
H_2CS	11	—10
CH_2NH	5,7	—10
HCOOH	18	—10
CH_3C_2H	0,35	—9

Туманности и остатки сверхновых. *Планетарные туманности* (табл. 45.29) [56] представляют собой сферические оболочки вокруг очень горячих ($T \approx 3 \cdot 10^4 \div 10^5$ К) звезд, ультрафиолетовое излучение которых служит источником возбуждения атомов туманности. Планетарная туманность возникает, когда звезда на поздних стадиях эволюции сбрасывает верхние слои, образуя расширяющуюся оболочку.

Диффузные туманности бывают трех типов. *Эмиссионные туманности* (зоны HII) возникают вокруг горячих звезд, ультрафиолетовое излучение которых ионизует окружающий межзвездный газ. В *отражательных туманностях* межзвездная пыль подсвечивается яркими звездами более позднего спектрального класса (менее горячих), чем B2. В *остатках вспышек сверхновых* излучают нагретый ударной волной газ и релятивистские электроны (рис. 45.38).

Зависимость радиуса зоны HII R, пк, от плотности среды N, см$^{-3}$, и типа возбуждающей звезды имеет вид [1]

$$R = S_0 N^{-2/3},$$

где S_0 определяется по спектральному классу звезды:

класс	O5	O8	B0	B2	B5	A0
S	100	65	35	15	3	1

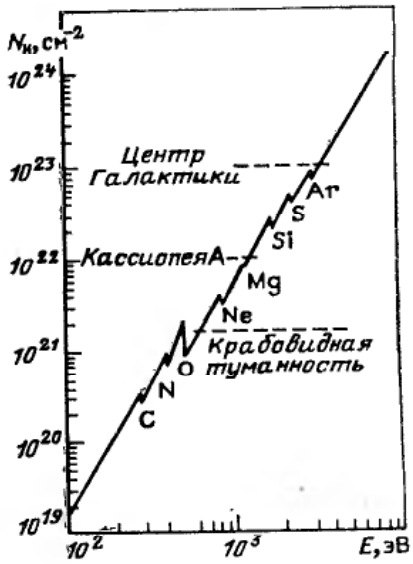
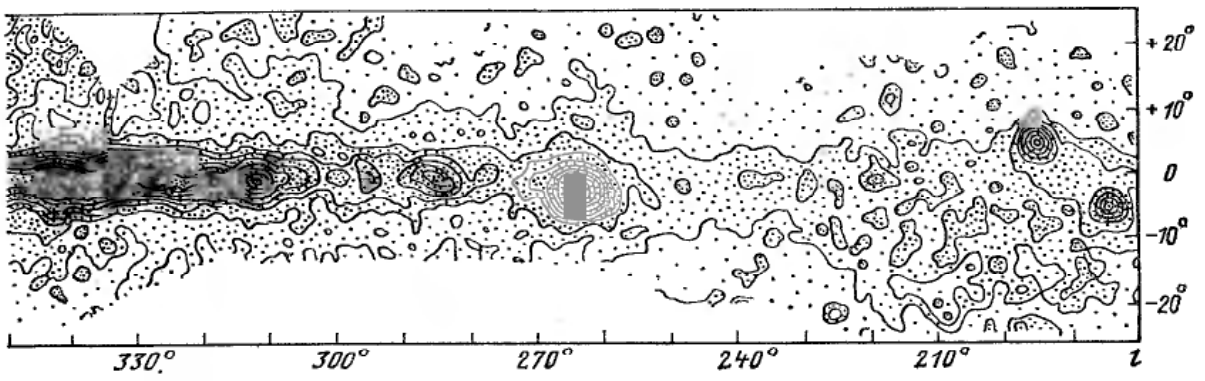


Рис. 45.37. Поглощение рентгеновского излучения межзвездным газом. Приведено число атомов водорода N_H на луче зрения, при котором оптическая толщина равна единице для данного значения энергии фотона E [52]

Благодаря малой плотности газа зоны HII интенсивно излучают в запрещенных линиях (табл. 45.30).

Параметры некоторых диффузных туманностей приведены в табл. 45.31, 45.32 (см. также рис. 45.39).

Межзвездные мазеры [59]. В отдельных плотных образованиях межзвездного газа, расположенных рядом с сильными источниками возбуждения, может возникать мазерное излучение. Наблюдаются мазеры на вращательных переходах молекул OH, H_2O, SiO и CH_2OH (табл. 45.33). Различают мазеры, связанные с холодными звездами больших размеров, излучающими в инфракрасном диапазоне (табл. 45.34), и мазеры,



по небу в галактических координатах [54]

Таблица 45.29. **Характеристики некоторых планетарных туманностей [1]**

Туманность	Плотность потока в линии H_β, 10^{-16} Вт/м²	Температура, 10^3 К	Температура центральной звезды, 10^3 К	lg N [см$^{-3}$]	Диаметр, пк	Масса, $M_\odot$	Плотность потока на частоте 1 ГГц, Ян	Спектральный индекс радиоизлучения*	Скорость расширения, км/с	Расстояние, пк
IC 418	800	12	36	4,1	0,09	0,04	0,66	+0,9	0	1500
NGC 3242	300	14	50	3,0	0,1	0,04	0,90	0,0	20	800
NGC 6572	800	11	50	4,0	0,05	0,10	0,24	+2,0	4	900
NGC 6720 («Кольцо»)	320	10	90	3,0	0,2	0,17	0,44	+0,1	19	700
NGC 7009 («Сатурн»)	280	12	50	4,0	0,08	0,09	0,52	+0,8	19	700
NGC 7662	250	14	60	3,9	0,06	0.07	0,07	0,0	25	900

* Спектральный индекс d lg (интенсивность)/d lg (частота).

Таблица 45.30. **Коэффициенты вероятностей A спонтанных переходов для некоторых запрещенных линий, наблюдаемых в туманностях [57]**

Переход	O III		N II		O I	
	Длина волны, нм	A, с$^{-1}$	Длина волны, нм	A, с$^{-1}$	Длина волны, нм	A, с$^{-1}$
$^3P_2 - {}^1D_2$	500,684	0,021	658,34	0,0030	630,023	0,0069
$^3P_1 - {}^1D_2$	495,891	0,0071	654,81	0,00103	636,388	0,0022
$^3P_0 - {}^1D_2$	493,10	$1{,}9\cdot10^{-6}$	652,74	$4{,}2\cdot10^{-7}$	639,2	$1{,}1\cdot10^{-6}$
$^1D_2 - {}^1S_0$	436,321	1,6	575.48	1,08	557,735	1,28

связанные с областями HII вокруг молодых горячих звезд (табл. 45.35).

Межзвездная пыль и поглощение света звезд [1, 61]. Приведем параметры межзвездной пыли и характеристики поглощения в межзвездном пространстве:

масса пылинок — около 10^{-13} г;

размер пылинок 10^{-5}—10^{-4} см;

концентрация пылинок — порядка 10^{-12} см$^{-3}$;

плотность поглощающего вещества в межзвездном пространстве 10^{-22} кг/м^3 = 0,0015 $M_\odot$/пк^3;

поглощение света звезд вблизи галактической плоскости в окрестностях Солнца характеризуется величиной $A_V = 1{,}9$ зв. вел./кпк.

Зависимость поглощения от длины волны излучения приводит к покраснению света звезд, которое характеризуется избытком цвета $E(\lambda_1, \lambda_2)$, представляющим собой разность поглощений на длинах волн λ_1 и λ_2, выраженных в звездных величинах (рис. 45.40). В качестве стандартных значений λ_1 и λ_2 принимают центры полос B и V. Соответствующий избыток цвета

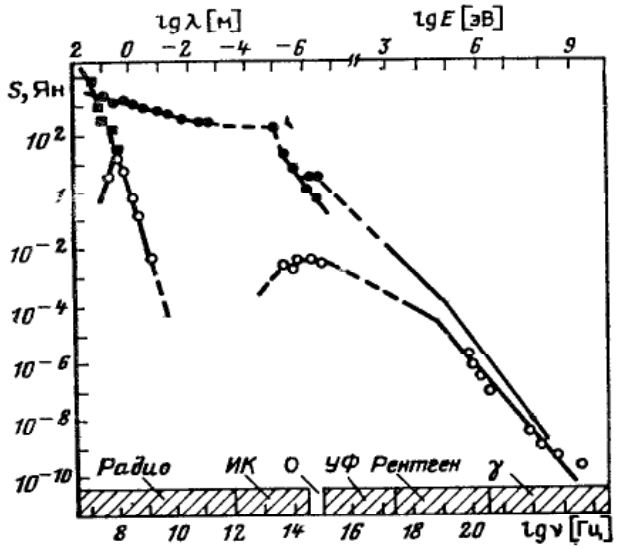


Рис. 45.38. Спектры Крабовидной туманности (темные кружки), ее пульсара (светлые кружки) и компактного радиоисточника в центре туманности (квадратики) [32]. Обозначение диапазонов то же, что на рис. 45.7

обозначается E_{B-V}. Для перехода от избытка цвета к абсолютному значению поглощения служит множитель

$$R = A_V / E_{B-V}.$$

В среднем R равен 3,1, но в темных облаках (табл. 45.36) может составлять 5—6.

Таблица 45.31. **Характеристики некоторых эмиссионных (Е) и отражательных (С) туманностей [1]**

Туманность	Тип	Расстояние, пк	Диаметр, пк	Масса газа, $M_\odot$	Плотность, $см^{-3}$	Плотность потока излучения в H_α, 10^{-6} Вт/(м²·ср)	Плотность потока радиоизлучения (λ=20 см), Ян	Класс возбуждающей звезды
В звездном скоплении Плеяды (М45)	С	126	1,5	—	—	—	—	B7
В созвездии Орион (М42)	Е	460	5	300	600	13	440	O8
«Конская голова»	СЕ	350	3	0,6	25	—	—	B1
«Тарантул»	Е	$5 \cdot 10^4$	250	10^5	—	—	—	Группа звезд класса О
«Розетка»	Е	$1{,}1 \cdot 10^3$	15	$9 \cdot 10^3$	30	1,8	300	O6
«Лагуна» (М8)	Е	$1{,}2 \cdot 10^3$	9	10^3	80	7	380	O5
«Северная Америка»	СЕ	700	20	$8 \cdot 10^3$	15	0,8	510	A2
«Кокон»	С	$1{,}6 \cdot 10^3$	2	7	70	—	—	B1
«Трехраздельная» (М20)	Е	10^3	4	150	100	6	30	O7

Таблица 45.32. **Характеристики остатков сверхновых [58]**

Название остатка (год вспышки)	Расстояние, кпк	Диаметр, пк	Возраст на 1980 г., лет	Радиоизлучение: Плотность потока (ν=1000 МГц), Ян	Радиоизлучение: Спектральный индекс	Рентгеновское излучение: Светимость*, 10^{28} Вт	Рентгеновское излучение: Температура, 10^6 К	Оценка средней скорости расширения, км/с
Кассиопея А (1680)	3	3,5	300	3100	—0,8	33	15 и 60	5500
Сверхновая Кеплера (1604)	10	6,6	376	20	—0,6	30		
Сверхновая Браге (1572)	5	10,7	408	52	—0,6	17	6 и 40	5000
Сверхновая 1181	8	12	799	35	—0,1	Не обнаружено		
Крабовидная туманность (1054)	2	3	926	1000	—0,2	310		1200
Сверхновая 1006	4	40	974	25	—0,6	0,2	20	1800
Сверхновая 185	2,5	28	1795	33	—0,4	17	6	600
IC 443	1,5	20	3400	180	—0,5	1	17	800
Корма А	2,2	20	5000	145	—0,4	60	7	700
Парус Х	0,5	30	13 000	1800	—0,3	5	4	500
Петля в созвездии Лебедя	0,8	30	20 000	160	—0,5	16	3	400
HB21	1,1	35	>35 000	225	—0,4	1	<2	<200

* В диапазоне 0,2—10 кэВ.

Таблица 45.33. **Параметры наблюдаемых мазерных переходов**

Молекула	Переход	Частота ν, МГц	Длина волны λ, см	A, $с^{-1}$
OH	$^2\Pi_{3/2}$ $J=3/2$ $F=1\to2$	1612,231	18,6	$1{,}29\cdot10^{-11}$
	$^2\Pi_{3/2}$ $J=3/2$ $F=1\to1$	1665,402	18,0	$7{,}11\cdot10^{-11}$
	$^2\Pi_{3/2}$ $J=3/2$ $F=2\to2$	1667,359	18,0	$7{,}11\cdot10^{-11}$
	$^2\Pi_{3/2}$ $J=3/2$ $F=2\to1$	1720,530	17,4	$9{,}42\cdot10^{-12}$
	$^2\Pi_{3/2}$ $J=5/2$ $F=2\to2$	6030,747	5,0	$1{,}53\cdot10^{-9}$
	$^2\Pi_{3/2}$ $J=5/2$ $F=3\to3$	6035,092	5,0	$1{,}57\cdot10^{-9}$
	$^2\Pi_{1/2}$ $J=1/2$ $F=0\to1$	4660,242	6,4	$1{,}08\cdot10^{-9}$
	$^2\Pi_{1/2}$ $J=1/2$ $F=1\to0$	4765,562	6,3	$3{,}86\cdot10^{-10}$
	$^2\Pi_{3/2}$ $J=7/2$ $F=4\to4$	13441,371	2,2	$9{,}26\cdot10^{-9}$
H_2O	$6_{16}\to5_{23}$	22235,080	1,35	$1{,}91\cdot10^{-9}$
SiO	$^1\Sigma v=1$, $J=1\to0$	43122,03	0,70	$3{,}00\cdot10^{-6}$
	$v=1$, $J=2\to1$	86243,27	0,35	$2{,}87\cdot10^{-5}$
	$v=1$, $J=3\to2$	129363,12	0,23	$1{,}04\cdot10^{-4}$
	$v=2$, $J=1\to0$	42820,48	0,70	$2{,}93\cdot10^{-6}$
CH_3OH	$J=4$ $k=2\to1$	24933,468	1,20	$8{,}40\cdot10^{-8}$
	5 $k=2\to1$	25959,080	1,20	$8{,}74\cdot10^{-8}$
	6 $k=2\to1$	25018,123	1,20	$8{,}98\cdot10^{-8}$
	7 $k=2\to1$	25124,873	1,20	$9{,}21\cdot10^{-8}$
	8 $k=2\to1$	25294,411	1,20	$9{,}48\cdot10^{-8}$

Таблица 45.34. **Характеристики мазеров, связанных со звездами, излучающими в инфракрасном диапазоне**

Величина	H_2O	OH	SiO
Число наблюдаемых переходов	1	3	4
Число известных объектов	~50	~50	16
Ширина линии, км/с	1—2	1—2	0,5—2
Кинетическая температура*1, К	400—1600	400—1600	250—3500
Число спектральных деталей	1—10	2—10*2	1—10
Диапазон скоростей, км/с	5—50	5—80	2—15
Поляризация	Нет	Мала	Нет (?)
Время жизни деталей, с	$>10^7$	$>10^7$	—
Размер пятен, см	10^{14}	10^{15}	$<10^{16}$
Яркостная температура, К	10^{11}—10^{12}	10^9—10^{11}	$>10^3$
Размер группы источников, см	10^{15}	$2\cdot10^{15}$	—
Мощность, Вт*3	10^{17}—10^{21}	10^{17}—10^{21}	10^{19}—10^{20}

*1 Определяется по ширине линий в предположении, что нет сужения линий и крупномасштабных движений газа.
*2 Больше у сверхгигантов.
*3 В предположении изотропного излучения.

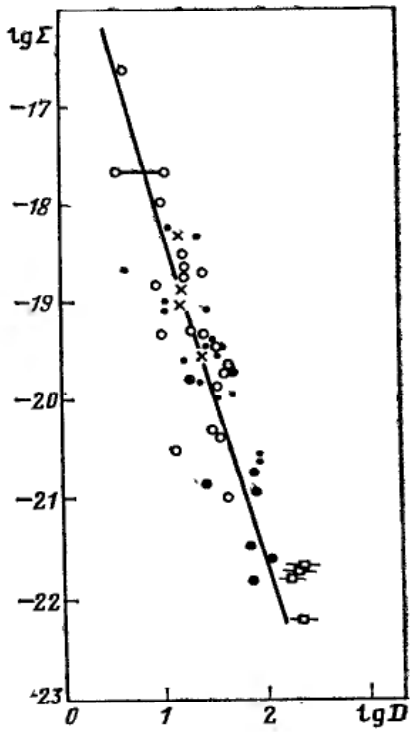


Рис. 45.39. Зависимость радиояркости Σ, Вт/(м²·Гц·ср), на частоте 1 ГГц от диаметра D, пк, остатка сверхновой [59]

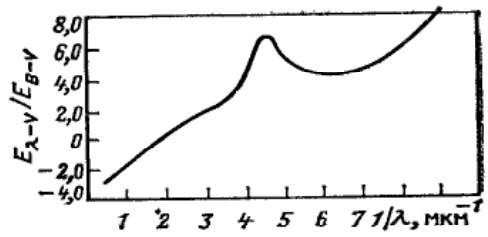


Рис. 45.40. Нормированная кривая межзвездного поглощения [52]

Отношение масс пыли и газа в разных облаках одинаково и равно примерно 10^{-2}. Связь числа атомов H на луче зрения N_H, $см^{-2}$, с избытком цвета E_{B-V} дается выражением

$$N_H = 5{,}9\cdot10^{21}\,E_{B-V}.$$

Газово-пылевые комплексы и звездообразование [3, 52]. Значительная часть межзвездного газа в спиральных рукавах собрана в газово-пылевые комплексы размером десятки и сотни парсек. В них вкраплены плотные ($n\approx10^3$ $см^{-3}$) холодные ($T\approx10$ К) молекулярные облака, в которых газ конденсируется в звезды (рис. 45.41). Молодые горячие звезды образуют вокруг себя *компактные зоны* HII [62] размером 0,1—1 пк, плотностью 10^3—10^6 $см^{-3}$ и массой 10^{-2}—1 $M_\odot$,

Таблица 45.35. **Характеристики мазеров, связанных с областями HII**

Величина	H_2O	OH	SiO	CH_3OH
Число наблюдаемых переходов	1	9	4	4
Число известных объектов	~50	~50	1*1	1*1
Ширина линии, км/с	0,5—2	0,1—1	2	0,5
Кинетическая температура, К*2	100—1500	4—400	3500	150
Число спектральных деталей	1—100	1—50	5	3
Диапазон скоростей, км/с	1—300	1—30	25	4
Поляризация, %	0—10 (линейная)	0—100 (линейная) 0—100 (круговая)	0—20 (круговая)	Нет
Время жизни деталей, с*3	10^6—10^7	10^7—10^8	—	—
Размер пятен, см	10^{13}—10^{14}	10^{14}—10^{15}	$<10^{16}$	$<10^{16}$
Яркостная температура, К	10^{13}—10^{15}	10^{12}—10^{13}	$>10^{13}$	$>10^3$
Размер группы источников, см	10^{16}—10^{17}	10^{16}—10^{17}	—	10^{17}
Мощность, Вт*4	10^{20}—10^{26}	10^{20}—10^{23}	10^{22}	10^{20}

*1 Единственный известный источник — Орион А.
*2 В предположении, что нет сужения линий и крупномасштабных движений газа.
*3 Имеется несколько случаев, когда характерное время меньше.
*4 В предположении изотропного излучения.

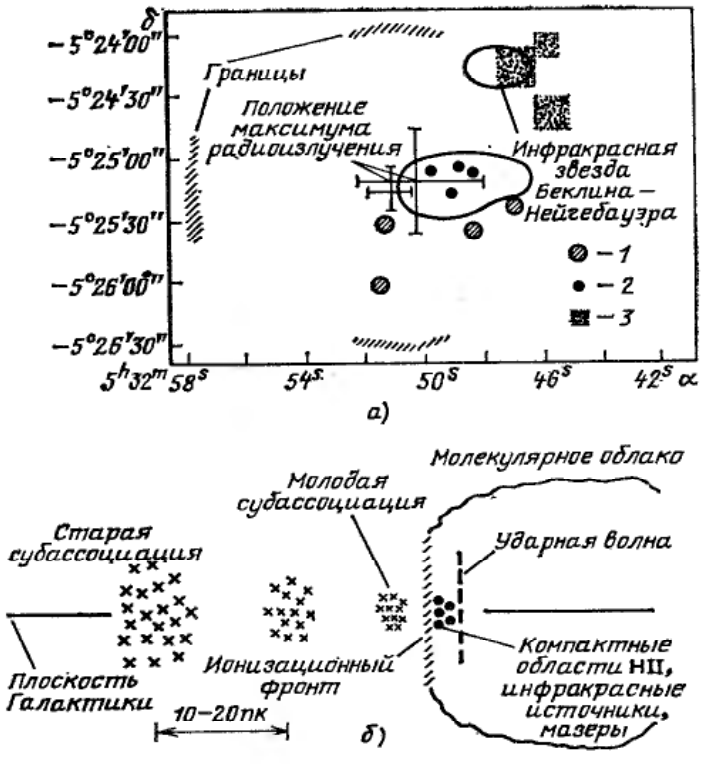


Рис. 45.41. Схема очага звездообразования, связанного с туманностью Ориона, (*а*) и типичная схема крупного очага звездообразования с бегущей по нему волной звездообразования (*б*) [53]:

1 — компактные зоны HII; *2* — звезды Трапеции Ориона; *3* — H_2O-мазеры; сплошной линией очерчены инфракрасные туманности

Таблица 45.36. **Статистические свойства пылевых облаков [61]**

Характеристика	Стандартное облако	Большое облако
Среднее значение E_{B-V} на облаке, E_0	0,061 (6)	0,29 (6)
k — число облаков на расстоянии 1 кпк	6,2 (3)	0.8 (2)
Селективное поглощение на 1 кпк, kE_0	0,38 (5)	0,23 (1)

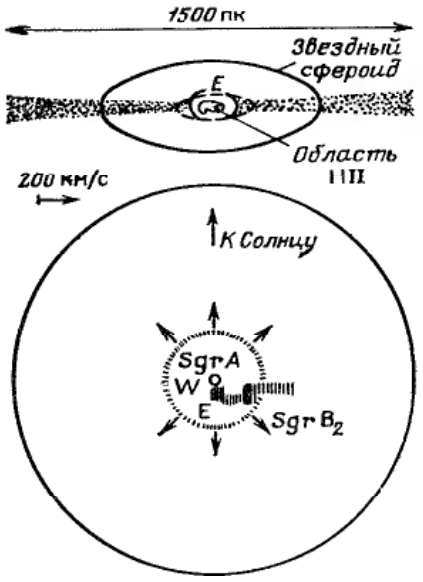


Рис. 45.42. Центр Галактики. Показаны положение радиоисточников Стрелец B2 и Стрелец A (с компонентами W и E) и расширяющееся молекулярное кольцо [64]

которые в свою очередь окружены непрозрачной оболочкой из пыли и газа. Эти оболочки переизлучают коротковолновое излучение центральной звезды в инфракрасном диапазоне (светимость 10^2—10^5 $L_\odot$). Из молодых звезд происходит интенсивное истечение вещества, в котором возникают плотные ($n \approx 10^4$ см$^{-3}$) образования, движущиеся со скоростями около 100 км/с, — *объекты Хербига — Аро* [63]. Их температура — порядка 10^4 К, светимости (в основном эмиссионные линии) 1—10^3 $L_\odot$. С областями звездообразования связаны мазерные источники. Скорость звездообразования в Галактике 4 $M_\odot$/год. Вновь образовавшиеся звезды распределены по массам по закону: число звезд dN в интервале масс от M до $M+dM$ равно $dN=\psi(M)dM$, где $\psi(M)=AM^{-3,5}$ (функция Солпитера). Эта аппроксимация действует в области $0{,}3\ M_\odot < M < 50 M_\odot$.

Центр Галактики [64, 65]. Межзвездное поглощение в направлении на центр Галактики превышает 27^m, поэтому наблюдать его можно только в радио-, инфракрасном или рентгеновском и γ-диапазонах. В центре Галактики расположены звездный сфероид массой около 10^{10} $M_\odot$, а также вращающийся со скоростью 200 км/с газовый диск, состоящий из молекулярного и атомарного водорода (рис. 45.42). Центральная протяженная зона HII имеет вид сфероида радиусом около 150 пк и массой около 10^6 $M_\odot$.

Непосредственно в центре расположен радиоисточник Стрелец А Западный (Sgr AW). Его размер — менее 10^{13} м, мощность $3 \cdot 10^{26}$ Вт. Полная инфракрасная светимость пыли в центральной области радиусом 1 пк составляет $2 \cdot 10^6$ $L_\odot$. Для поддержания ионизации газа в центральной области и нагрева пыли, ответственной за инфракрасное излучение, мощность ионизирующего излучения центрального источника должна составлять $(1 \div 3) \cdot 10^7$ $L_\odot$. Анализ распределения скоростей газа показывает, что в центральной области размером 1 пк сосредоточена масса примерно 10^6 $M_\odot$. В направлении на центр зарегистрирован источник излучения в γ-линии 511 кэВ, соответствующей e^+ e^--аннигиляции. Мощность, излучаемая в линии, меняется за времена порядка 1/2 года и достигает $2 \cdot 10^{30}$ Вт. Ширина линии — менее $(1{,}6^{+0,9}_{-1,6})$ кэВ. Полная светимость центра Галактики в диапазоне 10 кэВ — 10 МэВ составляет $3 \cdot 10^{31}$ Вт.

На расстоянии 10 пк от центра расположен остаток сверхновой Стрелец А Восточный (Sgr AE), который удаляется от центра со скоростью 40 км/с. Радиоисточник Стрелец В2 (Sgr B2) представляет собой молекулярное облако размером около 30 пк и массой до $3 \cdot 10^6$ $M_\odot$. Центр окружен молекулярным кольцом радиусом примерно 200 пк, расширяющимся со скоростью 140 км/с и вращающимся со скоростью 50 км/с. Его масса — порядка 10^7 $M_\odot$. В облаке Sgr B2 наблюдаются компактные зоны HII, мазеры, излучающие в линиях гидроксила и паров воды. В зоне центра обнаружено несколько рентгеновских источников. Один из них совпадает с Sgr AW. Его светимость в диапазоне $E = 0{,}5 \div 4{,}5$ кэВ составляет $1{,}5 \cdot 10^{28}$ Вт.

45.6. ГАЛАКТИКИ И ВСЕЛЕННАЯ

Структура и классификация галактик [66, 67]. Большинство галактик состоит из двух основных звездных компонентов: массивного диска и сфероидального компонента. Яркость сфероидального компонента I изменяется с радиусом r по закону

$$\lg I(r)/I_1(0) \approx (r/r_e)^{1/4},$$

где r_e — эффективный радиус. Яркость дисковой составляющей распределена в плоскости диска по закону

$$I(r)/I_2(0) \approx \exp(-r/r_0),$$

где $r_0 \approx 2 \div 6$ кпк, а в плоскости, перпендикулярной плоскости диска, — по закону

$$I(z)/I_3(0) \approx \mathrm{ch}^{-2}(z/z_0),$$

где $z_0 \approx 0{,}6 \div 0{,}8$ кпк.

Эллиптические галактики [обозначение En, где n=0, 1, ..., 7, характеризует сжатие галактики $\varepsilon = (a-b)/a$, $n = 10\,\varepsilon$] состоят практически только из сфероидального компонента. Их массы — от 10^5 до 10^{13} $M_\odot$, светимости — от 10^4 до 10^{12} $L_\odot$. К этому типу принадлежит почти 25% всех галактик.

В *спиральных галактиках* (обозначение Sa, Sb, Sc в соответствии со степенью развития спиралей) преобладает дисковая составляющая, но сфероидальный компонент присутствует всегда. Выделяют спиральные галактики с перемычкой (SBa, SBb, SBc). Доля галактик этих двух типов составляет почти 50%. Их массы — порядка 10^8—10^{12} $M_\odot$, светимости 10^8—10^{11} $L_\odot$. Промежуточными между эллиптическими и спиральными галактиками являются галактики линзовидного типа (SO). К нему принадлежит 20% всех галактик. *Неправильные галактики* IrI и IrII подразделяются по типу их звездного населения (I и II соответственно). Их массы не превышают 10^{10} $M_\odot$, светимости — 10^{10} $L_\odot$.

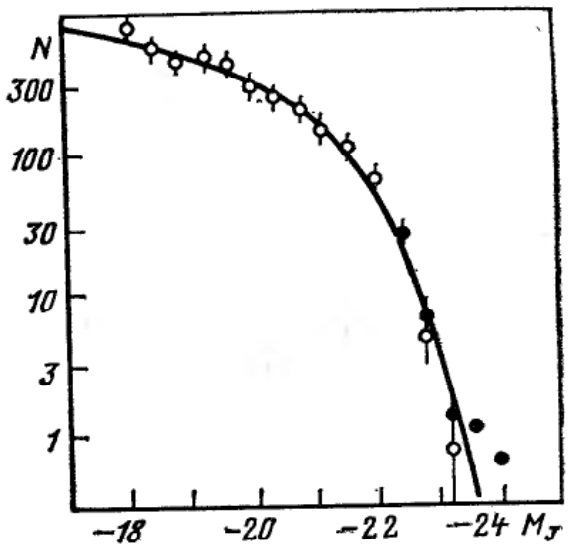


Рис. 45.43. Функция светимости галактик. По оси ординат отложено число галактик N, по оси абсцисс — абсолютная звездная величина в полосе J, характеризуемой соотношениями $\lambda = 0{,}5$ мк, $\Delta\lambda = 0{,}07$ мк, $M_J = M_V + 0{,}35\ (M_B - M_V)$ [54]

Таблица 45.37. **Отношение масса — светимость и массовая доля нейтрального водорода для галактик различных типов** [48, 67]

Тип галактик	$(M/L)/(M_\odot/L_\odot)$	M_{HI}/M
E	20—40	~ 0
SO	10	0,005
Sa	10	0,03
Sb	10	0,05
Sc	<10	0,07
IrI	<10	0,2

Параметры различных типов галактик приведены в табл. 45.37. Распределение галактик по светимостям L имеет вид (рис. 45.43)

$$\Phi(L)\,dL = \Phi^*\,(L/L^*)^{-1,25}\exp(-L/L^*)\,d\,(L/L^*),$$

где $\Phi^*=1{,}5\cdot10^{-3}$ Мпк$^{-3}$; светимости L^* соответствует абсолютная звездная величина $M^*_B=-21$. Плотность светимости галактик $\rho_V=10^8\ L_\odot$ Мпк$^{-3}$.

Ближайшие к нам галактики объединены в гравитационно связанную систему, называемую Местной группой (табл. 45.38). Характеристики некоторых других галактик приведены в табл. 45.39.

Таблица 45.38. **Население Местной группы галактик** [3]

Семейство	Состав семейства с указанием созвездия, в котором находится галактика	Тип	Расстояние, кпк	Абсолютная звездная величина	Масса, $10^6\ M_\odot$
Галактики	Галактика (центр в Стрельце)	Sb	10	—21	250 000
	Большое Магелланово Облако (Тукан)	Ir	52	—18	14 000
	Малое Магелланово Облако (Золотая Рыбка)	Ir	71	—16	5000
	Печь	Ep	188	—13	20
	Скульптор	Ep	84	—12	3
	Лев I	Ep	220	—11	4
	Дракон	Ep	76	—9	0,1
	Малая Медведица	Ep	67	—9	0,1
	Лев II	Ep	220	—9	1
	Пегас	Ep	170	—9	—
	Орион	Ep	80	—7	—
	Козерог	Ep	70	—6	—
	Большая Медведица	Ep	120	—6	—
	Большая Медведица	Ep	130	—	—
	Секстан С	Ep	140	—	—
	Змея	Ep	30	—	—
	Киль	Ep	170	—	—
Туманности Андромеды	Андромеда (M31, NGC224)	Sb	690	—22	360 000
	Треугольник (M33, NGC598)	Sc	720	—19	20 000
	Андромеда (M32)	E2	690	—16	2600
	Андромеда (NGC205)	SB0	690	—15	2000
	Кассиопея (NGC 185)	E3	690	—15	100
	Кассиопея (NGC 147)	E5	690	—14	150
	Андромеда I	Ep	690	—11	1
	Андромеда II (Рыбы)	Ep	690	—11	1
	Андромеда III	Ep	690	—11	1
	Андромеда IV	Ir	690	—11	10
	Рыбы	Ir	690	—9	10
Периферия Местной группы	Кассиопея (IC 10)	Ir	1250	—17	15 000
	Кит (IC 1613)	Ir	770	—15	400
	Стрелец (NGC 6822)	Ir	600	—15	1500
	Кит (галактика Вольфа — Лундмарка — Меллотта)	Ir	1300	—14	300
	Секстан А	Ir	1300	—14	1000
	Лев А	Ir	1100	—13	400
	Козерог	Ir	1000	—11	30
	Дева	Ir	1000	—11	40
	Скульптор	Ir	1400	—10	10
	Стрелец	Ir	500	—9	10

Таблица 45.39. **Некоторые яркие галактики** [1]

Галактика	Тип	Диаметр, кпк	Расстояние, Мпк	Абсолютная звездная величина	Масса*, $\lg(M/M_\odot)$
NGC 55	Sc	12	2,3	—19,9	10,5
M81	Sb	16	3,2	—20,9	11,2
M82	Ir II	7	3	—19,6	10,5
NGC 3115	E7	5	4	—19,3	10,9
M87	E1	13	13	—21,7	12,6
M104 «Сомбреро»	Sa	8	12	—22	11,7
Центавр А (NGC5128)	E0p	15	4,4	—20	11,3
M51 «Водоворот»	Sc	9	3,8	—19,7	10,9
M83	SBc	12	3,2	—20,6	—

* Масса видимого вещества. Имеются основания считать, что полные массы многих галактик значительно больше, поскольку они окружены массивными невидимыми коронами.

Активные галактики и квазары [3]. Активные галактики характеризуются:

наличием компактного ядра со светимостью 10^{34}—10^{41} Вт;

быстрой (месяцы и дни) переменностью излучения;

нетепловым спектром с избыточными потоками в радио-, инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах (рис. 45.44);

4) широкими (10^3—10^4 км/с) эмиссионными линиями (рис. 45.45);

5) пекулярным внешним видом, свидетельствующим о взрыве, наличии выбросов типа струй.

Выделяют следующие основные типы активных галактик.

Сейфертовские галактики — спиральные (как правило) галактики с маленькими и аномально яркими ядрами. Ширины эмиссионных линий у сейфертовских галактик I типа 1000—3000 км/с, у II типа 500—1000 км/с. Светимость в инфракрасном и оптическом диапазонах 10^{35}—10^{39} Вт. Сейфертовские галактики I типа имеют сравнимые светимости в рентгеновском диапазоне. Спектр в диапазоне $E=1\div100$ кэВ обычно степенной.

Квазары — точечные источники светимостью в инфракрасном, оптическом и рентгеновском диапазонах 10^{36}—10^{41} Вт. Ширина эмиссионных линий 4000—6000 км/с. Примерно 1% квазаров являются радиоисточниками мощностью до 10^{39} Вт. Квазары — самые мощные объекты в наблюдаемой Вселенной (рис. 45.46). Самый далекий известный квазар имеет красное смещение $z=4{,}04$.

Лацертиды (объекты типа BL Ящерицы) — источники, подобные квазарам. Отличаются отсутствием эмиссионных линий и сильной (10—30%) переменной поляризацией излучения.

Радиогалактики — эллиптические (как правило) галактики со светимостью в радиодиапазоне 10^{35}—10^{38} Вт. Большая часть имеет двойную структуру: симметрично относительно центрального источника на расстоянии до нескольких мегапарсек расположено два радиоизлучающих облака. Спектр радиоизлучения обычно степенной (рис. 45.47).

Распределение активных галактик по светимости и спектральным индексам показано на рис. 45.48—45.50.

Скопления галактик [74]. Распределение галактик в пространстве сильно неоднородно. Функция корреляции галактик

$$\xi(R) = \langle N(r)\, N(r+R) - N^2(r)\rangle / \langle N^2(r)\rangle,$$

где N — плотность галактик, имеет вид [75] $\xi(R) = (R_0/R)^\gamma$, $R_0 = (4{,}23 \pm 0{,}52) h^{-1}$ Мпк; $\gamma = 1{,}77(4)$. Здесь $h = H/50$, где H — постоянная Хаббла, км/(с·Мпк). Эта функция удовлетворяет данным наблюдений при $R < 20h^{-1}$ Мпк.

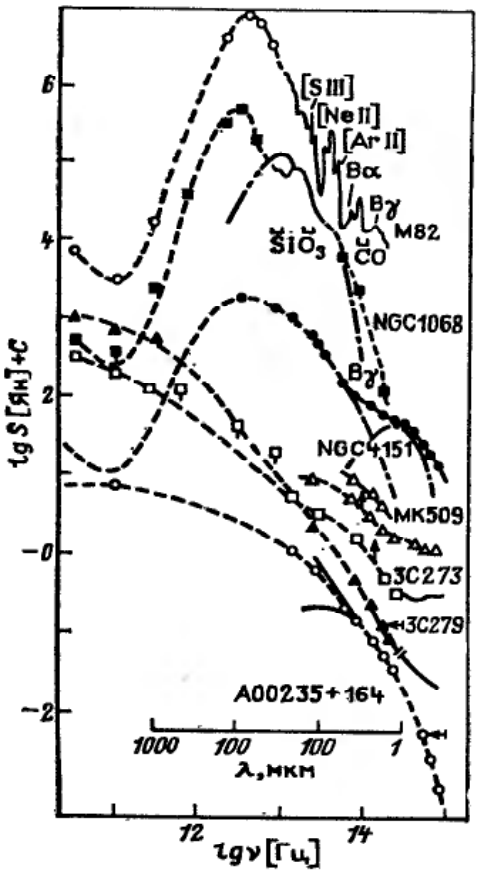


Рис. 45.44. Спектры активных галактик в инфракрасном, оптическом и радиодиапазонах. Для компактности спектры сдвинуты вдоль оси ординат, каждый на определенную величину C. Приведены спектры «взрывающейся галактики» M82 ($C=3{,}77$), сейфертовской галактики II типа NGC1068 ($C=3{,}07$), сейфертовских галактик I типа NGC4151 ($C=2{,}5$) и MK509 (1,77), квазаров 3C273 ($C=1$) и 3C279 ($C=2$) и лацертида A00235+164 ($C=0$) [68]

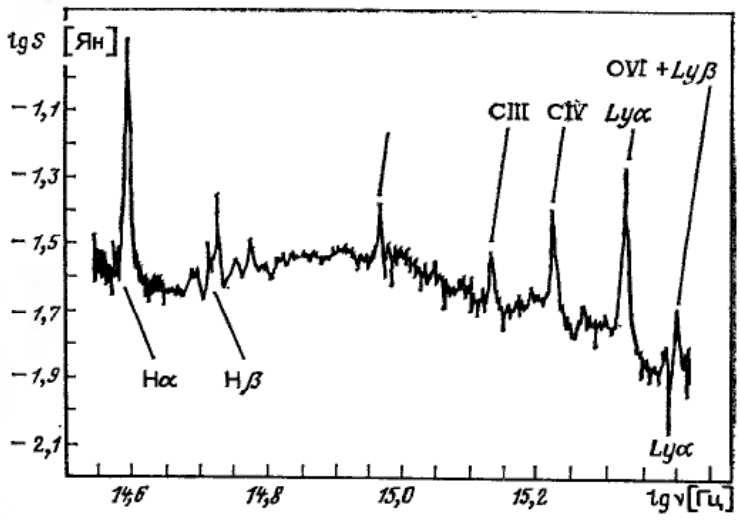


Рис. 45.45. Спектр квазара 3C273 в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах [69]

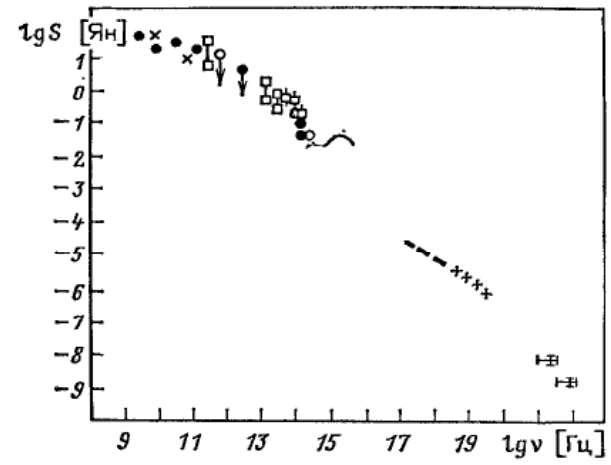


Рис. 45.46. Спектр квазара 3C273 от радио- до γ-диапазона [70]

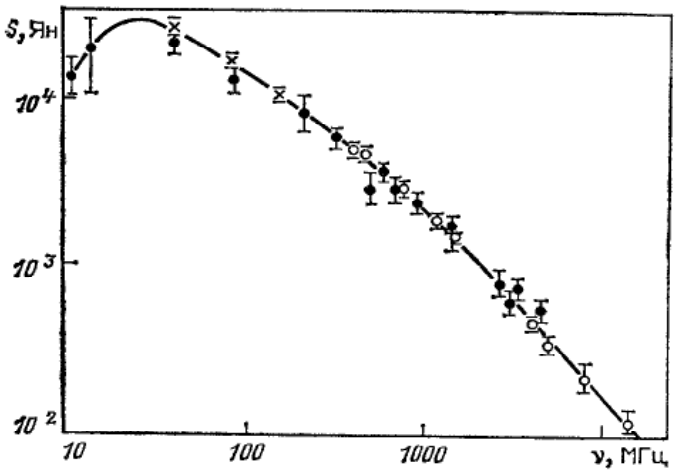


Рис. 45.47. Спектр радиогалактики Лебедь А [54]

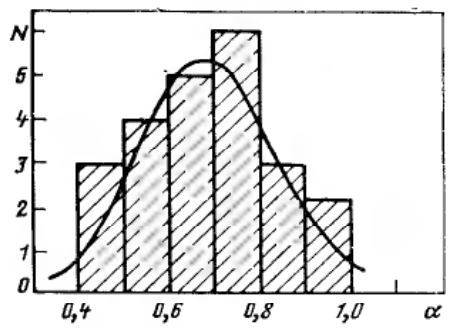


Рис. 45.48. Распределение спектральных индексов α активных галактик в рентгеновском диапазоне:
N — число галактик: $\alpha = -d\lg$ (интенсивность)/$d\lg$ (частота) [71]

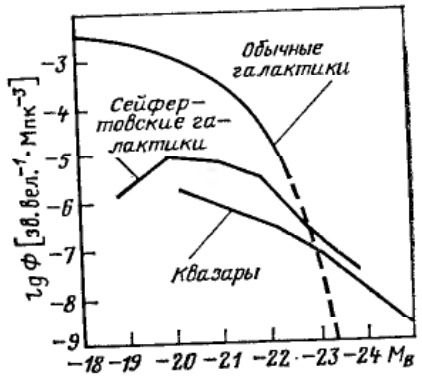


Рис. 45.49. Функция Ф светимости активных галактик. По оси абсцисс отложена абсолютная звездная величина в полосе B [72]

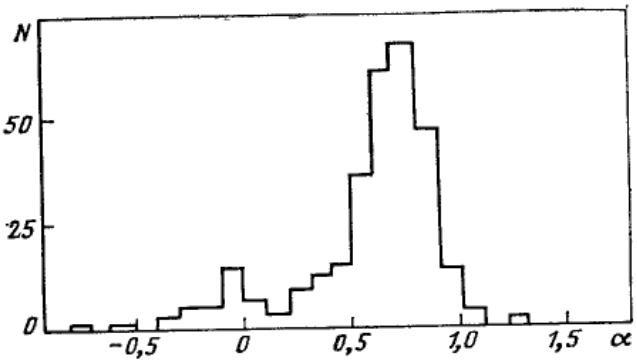


Рис. 45.50. Распределение спектральных индексов α радиогалактик в диапазоне частот от 178 до 1400 МГц [73]

Значительная часть галактик сосредоточена в скоплениях (рис. 45.51). Типичные массы скоплений 10^{12}—10^{15} $M_\odot$, они содержат сотни и тысячи галактик (табл. 45.40). Богатыми называются скопления, в которых в радиусе $3h^{-1}$ Мпк от центра скопления содержится не менее 50 галактик в диапазоне от m_3 до m_3+2, где m_3 — звездная величина третьей по яркости галактики в скоплении. Плотность галактик в центральных частях богатых скоплений распределена по закону Кинга

$$N(r) = N_0 \left(1 + r^2/r_c^2\right)^{-3/2},$$

где $r_c = 0{,}25(4)\ h^{-1}$ Мпк. Полный диаметр скоплений достигает 3—5 Мпк. Скопления заполнены газом с

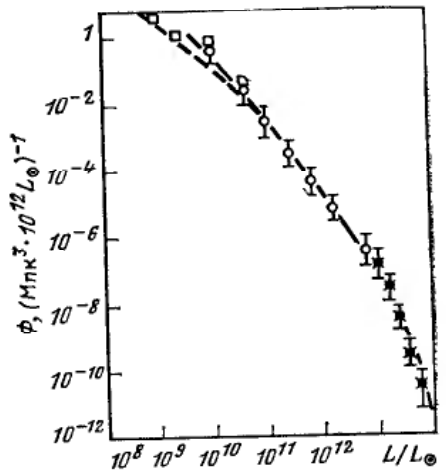


Рис. 45.51. Функция светимости скоплений и групп галактик [3]

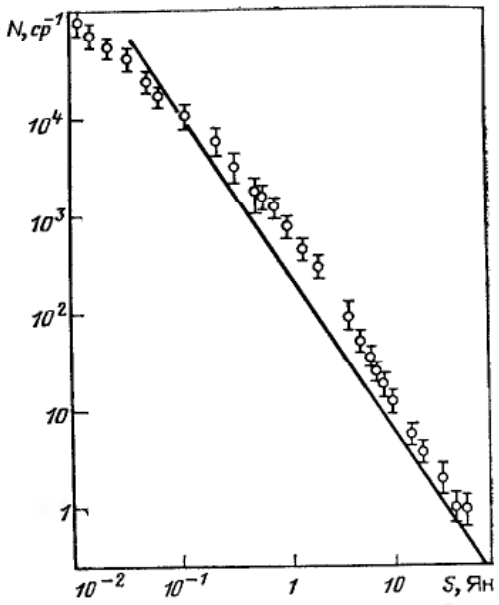


Рис. 45.52. Подсчеты радиоисточников на частоте 408 МГц:

сплошная линия — закон $S^{-3/2}$. Отклонения от этого закона в области больших S означают, что в прошлом радиоисточников было больше и (или) они были ярче, уплощение кривой подсчетов при малых S — результат космологических эффектов [79]

Таблица 45.40. **Некоторые скопления галактик**

Скопление	Число наблюдаемых галактик [1]	Расстояние*, Мпк [2]	Угловой размер, град [2]	Оптическая светимость, 10^{11} $L_\odot$ [2]	Дисперсия скоростей галактик вдоль луча зрения, км/с [78]	Температура газа, кэВ [78]	Рентгеновская светимость (2—10 кэВ), 10^{37} Вт [78]
Персей (А426)	500	120	4	10	1400	6,8	12,3
Дева	2500	23	12	12	700	2,2	0,3
Волосы Вероники (А1656)	800	135	4	50	900	8,8	7,6

* Для $H = 50$ км/(с·Мпк).

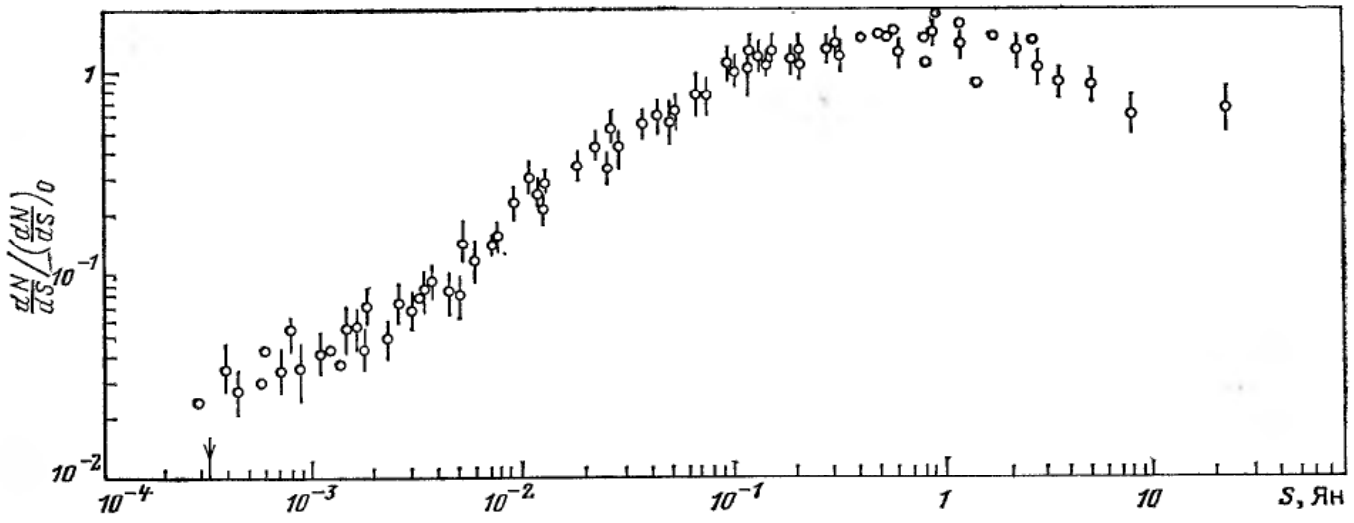


Рис. 45.53. Подсчет радиоисточников на $\lambda=21$ см:

кривая dN/dS, ср$^{-1}\cdot$Ян$^{-1}$, нормирована на закон $(dN/dS)_0=225\ S^{-5/2}$. Отклонение от этого закона в области больших S свидетельствует о том, что к настоящему времени число радиоисточников уменьшается. Спад в области малых S связан с неевклидовостью нашего мира [80]

температурой порядка 10^8 К и плотностью около 10^{-3} см$^{-3}$. Наблюдается тормозное рентгеновское излучение этого газа. Функция корреляции скоплений в диапазоне $5\,h^{-1}<R<100\ h^{-1}$ Мпк имеет вид [76]

$$\xi(R)=(R_0/R)^{\gamma},\ \gamma=1{,}6,\ R_0=50h^{-1}\ \text{Мпк}.$$

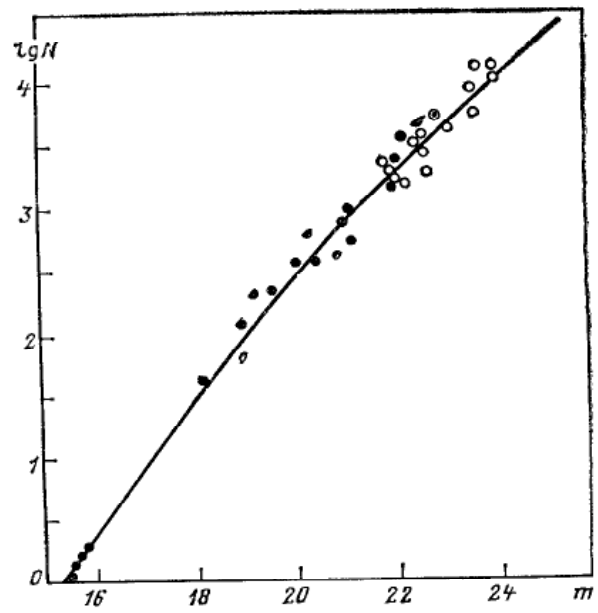


Рис. 45.54. Число галактик $N(m)$ ярче видимой величины m на квадратный градус [81]

В еще больших масштабах наблюдаются сверхскопления. Характерный размер сверхскопления — около 30 Мпк, масса — порядка $10^{16}\ M_\odot$. Типичное сверхскопление содержит два-три богатых скопления [77].

Подсчеты источников [79]. В евклидовом мире, однородно заполненном источниками, число источников $N(S)$, плотность потока от которых больше S, удовлетворяет закону $N\propto S^{-3/2}$ (в дифференциальной форме $dN/dS\propto S^{-5/2}$). Отклонения результатов подсчетов от этого закона объясняются эволюцией источников, а также космологическими эффектами (рис. 45.52—45.54).

Фоновое излучение (рис. 45.55). В него вносят вклад далекие галактики, горячий межгалактический газ, а также реликтовое излучение (микроволновое фоновое излучение), оставшееся после ранних горячих стадий развития Вселенной. Параметры фонового излучения в различных диапазонах приведены в табл. 45.41.

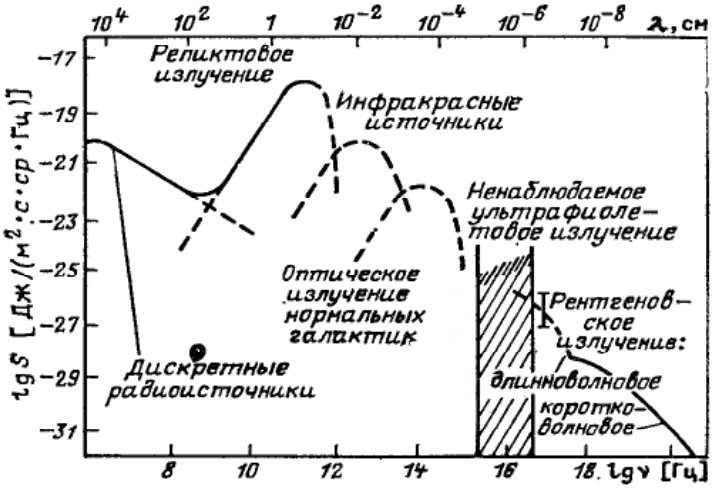


Рис. 45.55. Спектр электромагнитного фонового излучения во Вселенной:

сплошная линия — измерения, пунктир — теоретические оценки [82]

Микроволновое фоновое излучение [83], называемое реликтовым, имеет спектр, близкий к спектру излучения черного тела с температурой $T=2{,}7$ К (рис. 45.56), и характеристики:

плотность энергии 0,25 эВ/см^3;

скорость движения Солнца относительно микроволнового фона 300—400 км/с в направлении $\alpha=12^h$, $\delta=0°$;

возникающая в результате движения Солнца дипольная анизотропия яркости $\delta T/T=1{,}3\cdot10^{-3}\cos\theta$, где θ — угол между направлением движения и направлением наблюдения;

Таблица 45.41. **Плотность энергии и числа фотонов фонового излучения в различных диапазонах** [82]

Диапазон	Плотность энергии излучения, эВ/см³	Плотность числа фотонов, см⁻³
Длинноволновый радиодиапазон	$\sim 10^{-7}$	~ 1
Микроволновое фоновое излучение	$\sim 0{,}25$	~ 400
Инфракрасный	$\sim 10^{-2}$	~ 1
Оптический	$\sim 3\cdot 10^{-3}$	$\sim 10^{-3}$
Длинноволновый рентгеновский ($E < 1$ кэВ)	$\sim 10^{-4}$—10^{-5}	$3\cdot(10^{-7} \div 10^{-8})$
Коротковолновый рентгеновский ($E > 1$ кэВ)	$\sim 10^{-4}$	$\sim 3\cdot 10^{-9}$
γ-Излучение:		
$E = 1 \div 6$ МэВ	$\sim 3\cdot 10^{-5}$	$\sim 10^{-11}$
$E > 10$ МэВ	10^{-5}	10^{-12}

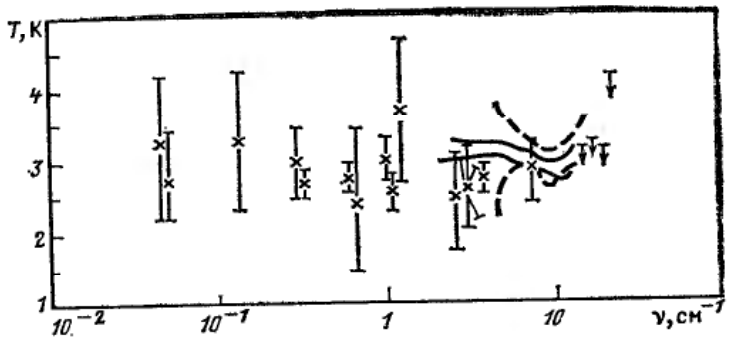


Рис. 45.56. Измерения яркостной температуры T микроволнового фонового излучения на разных длинах волн [83]

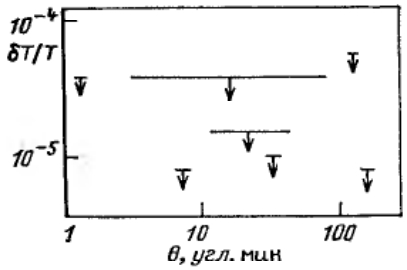


Рис. 45.57. Ограничения на флуктуации температуры микроволнового фонового излучения в различных угловых масштабах [84]

квадрупольная анизотропия яркости $\delta T < 2\cdot 10^{-4}$ К. Ограничения на мелкомасштабные флуктуации яркости приведены на рис. 45.57.

Космология. Основные параметры нашей Вселенной таковы:

постоянная Хаббла $H = 50 \div 100$ км/(с·Мпк);

критическая плотность вещества (при которой Вселенная оказывается замкнутой) $\rho_c = 4{,}7\cdot 10^{-30} h^2$ г/м³, где $h = H/50$ км/(с·Мпк);

плотность наблюдаемого вещества $\rho \approx 10^{-31}$ г/см³;

отношение числа барионов к числу фотонов $N_b/N_\gamma = (3 \div 10)\cdot 10^{-10}$ [85];

параметр плотности барионов $\Omega_b = \rho_b/\rho_c$, $0{,}01 \leqslant \Omega_b \leqslant 0{,}14$ [86];

плотность реликтовых нейтрино (трех сортов) [88] 450 см⁻³;

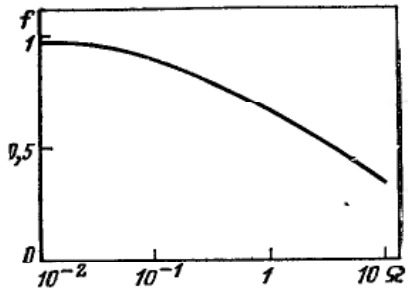


Рис. 45.58. Функция $f(\Omega)$, входящая в выражение для возраста Вселенной [85]

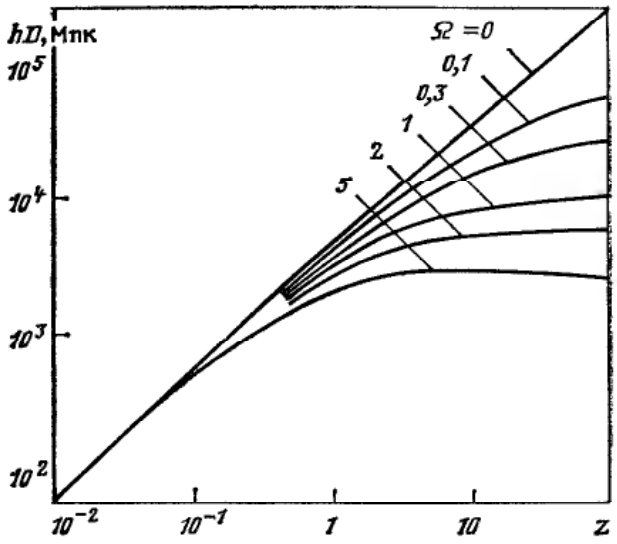


Рис. 45.59. Зависимость расстояния до источника D от красного смещения z для различных значений $\Omega = \rho/\rho_0$. Расстояние определено таким образом, что плотность потока пропорциональна D^{-2} [85]

космологическое ограничение на сумму масс нейтрино всех сортов [88] $\sum m_\nu c^2 < 200$ эВ;

возраст Вселенной в годах $t = (1{,}96/h)\, f(\Omega)\cdot 10^{10}$, где функция $f(\Omega)$ показана на рис. 45.58. Здесь Ω — плотность всех видов материи, выраженная в единицах критической плотности ρ_c.

Расширение Вселенной приводит к тому, что излучение далеких источников испытывает красное смещение тем большее, чем дальше источник (рис. 45.59). Поэтому положение источников характеризуется величиной $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, где λ_0 и λ — длины волн излучения, испущенного и принятого наблюдателем. Неевклидов характер Вселенной иллюстрируется рис. 45.60. Из него видно, что угол, под которым видно тело фиксированного размера, не падает до нуля с увеличением расстояния, а, достигнув определенного минимального значения, начинает расти.

На ранних стадиях эволюции Вселенная была заполнена горячей плазмой, которая охлаждалась в процессе расширения. Приблизительно через 500 с после

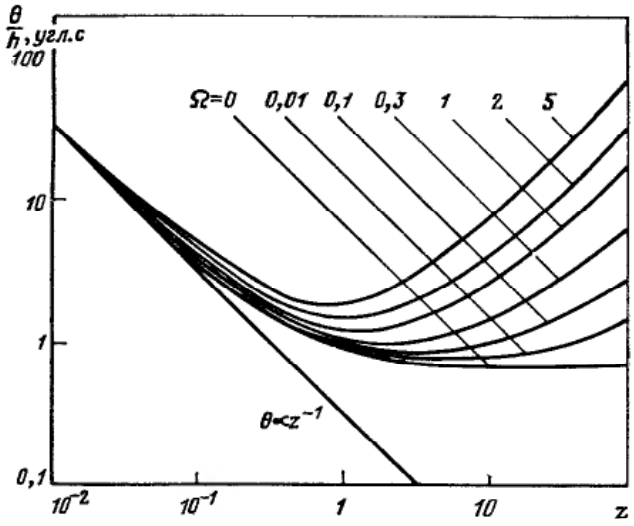


Рис. 45.60. Зависимость углового размера θ источника размером 10 кпк от его красного смещения z [85]

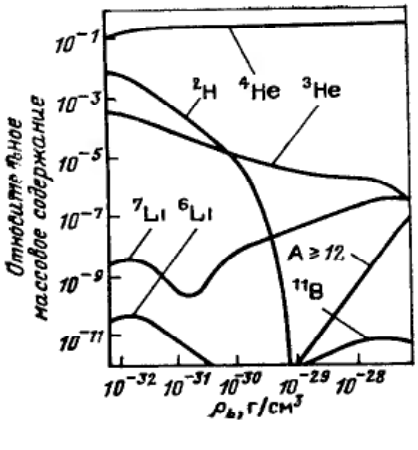


Рис. 45.61. Зависимость относительных содержаний элементов, образовавшихся в ходе космологического нуклеосинтеза, от плотности барионов в настоящее время. Расчеты проведены для современной температуры микроволнового фонового излучения 2,7 К [87]. Измерения дают следующие значения относительного массового содержания: $^2H/^1H \geqslant 10^{-5}$, $^7Li/^1H \approx 10^{-10}$, $(^2H + ^3He)/^1H \leqslant 10^{-4}$ [86]

начала расширения, когда температура упала до 10^9 К, прекратились ядерные реакции, которые поддерживали равновесие между нейтронами и протонами. В конце этой стадии происходил интенсивный синтез элементов (рис. 45.61), в частности образовалась бóльшая часть наблюдаемого гелия. Примерно через 200 тыс. лет при $T=4000$ К произошла рекомбинация водорода (гелий рекомбинировал несколько раньше), после чего Вселенная стала практически прозрачна для заполняющего ее теплового излучения. Благодаря этому становится возможным рост возмущений плотности вещества (до рекомбинации этому препятствовало давление излучения), который в конечном итоге приводит к образованию гравитационно связанных тел — скоплений, галактик и т. д. (рис. 45.62).

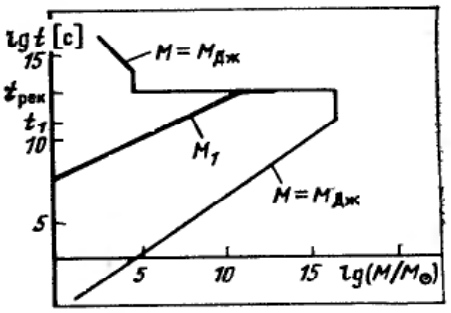


Рис. 45.62. Гравитационная неустойчивость во Вселенной. По оси ординат отложено время от начала расширения Вселенной, по оси абсцисс — масса возмущения $(\rho\lambda^3_{\text{возм}})$. Отмечены момент t_1, когда сравниваются плотности вещества и излучения, и момент рекомбинации водорода; $M_{Дж}$ — джинсовская масса (минимальное значение массы, при которой начинается гравитационная неустойчивость); M_1 — максимальная масса возмущений, затухших к данному моменту времени под действием лучистой вязкости и теплопроводности: $\Omega=1$ [85]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аллен К. У.** Астрофизические величины: Пер. с англ./Под ред. Д. Я. Мартынова. Перераб. и доп. изд. М.: Мир, 1977.

2. **Ленг К.** Астрофизические формулы: Пер. с англ. М.: Мир, 1978. Т. 1, 2.

3. **Физика** космоса: Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1986.

4. **Куликовский П. Г.** Звездная астрономия. М.: Наука, 1978.

5. **Гибсон Э.** Спокойное Солнце: Пер. с англ./Под ред. Э. В. Кононовича. М.: Наука, 1977.

6. **Bahcall J. N., Huebner W. F., Lubow S. H. e. a.**// Rev. Mod. Phys. 1982. Vol. 54, N 3. P. 767—800.

7. **Шкловский И. С.** Физика солнечной короны. М.: Физматгиз, 1962.

8. **Воронцов С. В., Жарков В. Н.**//Успехи физ. наук. 1981. Т. 134, вып. 4. С. 675—710.

9. **Поток** энергии Солнца и его измерения/Под ред. О. Уайта: Пер. с англ. М.: Мир, 1980.

10. **Крюгер А.** Солнечная радиоастрономия и радиоастрофизика: Пер. с англ./Под ред. В. З. Зайцева. М.: Мир, 1984.

11. **Mercury.** 1983. Vol. XII, N 4. P. 118—119.

12. **Russel C. T.**//Advances Space Research. 1981. Vol. 1, N 7. P. 257—264.

13. **Маров М. Я.** Планеты Солнечной системы. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1986.

14. **Ip W. H.**//Space Sci Rev. 1980. Vol. 26, N 1. P. 39—96.

15. **Симоненко А. Н.** Метеориты — осколки астероидов. М.: Наука, 1979.

16. **Чурюмов К. И.** Кометы и их наблюдения. М.: Наука, 1980.

17. **Stern D. P., Ness N. F.**//Апп. Rev. Astron. Astrophys. 1982. Vol. 20. P. 139—162.

18. **Akasofu S. I.**//Ibid. P. 117——138.

19. **Baranov V. B.**//Comm. Astrophys. 1981. Vol. IX, N 2. P. 75—91.

20. **Курт В. Г.**//Астрофизика и космическая физика/ Под ред. Р. А. Сюняева. М.: Наука, 1982. С. 268—292.

21. **Мартынов Д. Я.** Курс общей астрофизики. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1979.

22. **Grossman A. S., Hays D., Grabaske H. C.**//Astron. Astrophys. 1974. Vol. 30, N 1. P. 95—103.

23. **Кокс Дж. П.** Теория звездных пульсаций: Пер. с англ./Под ред. Д. К. Надежина. М.: Мир, 1983.
24. **Bath G. T.** Quart. Roy. Astron. Soc. 1978. Vol. 19, N 2. P. 442—455.
25. **Robinson E. L.**//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1976. Vol. 14. P. 119—142.
26. **Горбацкий В. Г.** Новоподобные и новые звезды. М.: Наука, 1974.
27. **Rydgren A. E., Strom S. E., Strom B. H.**//Astrophys. J. Suppl. 1976. Vol. 30, N 3. P. 307—336.
28. **Cohen M.**//Phys. Rep. 1984. Vol. 116. N 3. P. 173—232.
29. **Гершберг Р. Е.** Вспыхивающие звезды малых масс. М.: Наука, 1978.
30. **Боярчук А. А.**//Итоги науки и техники. Сер. астрон. М.: ВИНИТИ, 1983. Т. 22. С. 83—111.
31. **Trimble V.**//Rev. Mod. Phys. 1982. Vol. 54. N 4. P. 1183—1224.
32. **Шкловский И. С.** Сверхновые звезды. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976.
33. **Шапиро С., Тьюкольски С.** Белые карлики, черные дыры и нейтронные звезды: Пер. с англ./Под ред. Я. А. Смородинского. М.: Мир, 1985.
34. **Van Horn H. M.**//Phys. Today. 1979. Vol. 32, N 1. P. 23—30.
35. **Смит Ф. Г.** Пульсары: Пер. с англ./Под ред. А. Д. Кузьмина. М.: Мир, 1979.
36. **Манчестер Р., Тейлор Дж.** Пульсары: Пер. с англ./Под ред. А. Д. Кузьмина. М.: Мир, 1980.
37. **Backer D. C., Kulkarni S. R., Heiles C. e. a.**//Nature. 1982. Vol. 300, N 5893. P. 615—618.
38. **Liang H. P., Nolan P. L.**//Space Sci. Rev. 1984. Vol. 38, N 314. P. 353—384.
39. **White N.**//Advances Space Res. 1984. Vol. 3, N 10—12. P. 9—18.
40. **Borner G.**//Phys. Rep. 1980. Vol. 60, N 3. P. 153—203.
41. **White N. E., Swank J. H., Holt S. S.**//Astrophys. J. 1983. Vol. 270, N 2. P. 711—734.
42. **Sunyaev R. A., Trumper J.**//Nature. 1979. Vol. 279. P. 506—508.
43. **Holt S. S., McCray R.**//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1982. Vol. 20. P. 323—366.
44. **Мазец Е. П., Голенецкий С. В.**//Астрофизика и космическая физика/Под ред. Р. А. Сюняева. М.: Наука, 1982. С. 216—267.
45. **Владимирский Б. М., Гальпер А. М., Лучков Б. И. и др.**//Успехи физ. наук. 1985. Т. 145, вып. 2. С. 255—284.
46. **Марочник Л. С., Сучков А. А.** Галактика. М.: Наука, 1984.
47. **Kinematics,** Dynamics and Structure of the Milky Way/Ed. by W. L. H. Shuter. Dordrecht: D. Reidel. 1983.
48. **Faber S. M., Gallagher J. S.**//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1979. Vol. 17. P. 135—188.
49. **Bachall J. N., Soneira R. M.**//Astrophys. J. Suppl. 1980. Vol. 44, N 1. P. 73—110.
50. **Ефремов Ю. Н.**//Итоги науки и техники. Сер. астрон. М.: ВИНИТИ, 1985. Т. 27. С. 102—203.
51. **Холопов П. Н.** Звездные скопления. М.: Наука, 1981.
52. **Каплан С. А., Пикельнер С. Б.** Физика межзвездной среды. М.: Наука, 1979.
53. **Бочкарев Н. Г.**//Звезды и звездные системы/Под ред. Д. Я. Мартынова. М.: Наука, 1981. С. 265—325.
54. **Лонгейр М. С.** Астрофизика высоких энергий: Пер. с англ./Под ред. Р. А. Сюняева. М.: Мир, 1985.
55. **Терпер Б. Е.**//Галактическая и внегалактическая радиоастрономия/Под ред. Г. Л. Верскера и К. И. Келлермана: Пер. с англ. М.: Мир, 1976. С. 303—371.
56. **Костякова Е. Б.** Физика планетарных туманностей. М.: Наука, 1982.
57. **Соболев В. В.** Курс теоретической астрофизики. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1985.
58. **Псковский Ю. П.**//Звезды и звездные системы/Под ред. Д. Я. Мартынова. М.: Наука, 1981. С. 88—117.
59. **Лозинская Т. А.**//Итоги науки и техники. Сер. астрон. М.: ВИНИТИ, 1983. Т. 22. С. 33—82.
60. **Моран М. В.**//На переднем крае астрофизики/Под ред. Ю. Эвретта: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. С. 405—458.
61. **Спитцер Л.** Физические процессы в межзвездной среде. Пер. с англ./Под ред. Д. А. Варшаловича. М.: Мир, 1981.
62. **Habing H. J., Israel F. P.**//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1979. Vol. 17. P. 345—383.
63. **Schwarts R. D.**//Ibid. 1983. Vol. 21. P. 209—238.
64. **Oort J. H.**//Ibid. 1977. Vol. 15. P. 295—362.
65. **Центр Галактики**/ Под ред. Г. Р. Риглера и Р. Д. Блендфорда: Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
66. **Засов А. В.**//Итоги науки и техники. Сер. астрон. М.: ВИНИТИ, 1981. Т. 18. С. 3—47.
67. **Тейлер Р. Дж.** Галактики: строение и эволюция: Пер. с англ./Под ред. А. Г. Дорошкевича. М.: Мир, 1981.
68. **Rieke G. H., Lebofsky M. J.**//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1979. Vol. 17. P. 447—512.
69. **Puetter R. C., Burbidge E. M., Smith H. E. e. a.**// Astrophys. J. 1982. Vol. 257. P. 487—498.
70. **Ulrich M. H.**//Space Sci. Rev. 1981. Vol. 28, N 1. P. 89—104.
71. **Mushotsky R. F.**//Advances Space Research. 1984. Vol. 3, N 10—12. P. 157—166.
72. **Meurs E. J., Wilson A. A.**//Astron. Astrophys. 1984. Vol. 136, N 1. P. 206—226.
73. **Пахольчик А.** Радиогалактики: Пер. с англ. М.: Мир, 1980.
74. **Bahcall N.**//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1977. Vol. 15. P. 505—540.
75. **Пиблс Ф. Дж.** Структура Вселенной в больших масштабах: Пер. с англ./Под ред. А. Г. Дорошкевича. М.: Мир, 1983.
76. **Клыпин А. А., Копылов А. И.**//Письма в астрон. журн., 1983. Т. 9, № 2. С. 75—81.
77. **Oort J. H.**//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1983. Vol. 21. P. 373—407.
78. **Mushotsky R. F., Serlemitsos P. J., Smith B. W. e. a.**//Astrophys. J. 1978. Vol. 225, N 1. P. 21—38.
79. **Лонгейр М.**//Успехи физ. наук. 1969. Т. 99, вып. 2. С. 229—248.
80. **Windhorst R.** Ph. D. Thesis. University of Leiden, 1984.
81. **Караченцев И. О., Копылов А. И.**//Письма в астрон. журн. 1977. Т. 3, № 6. С. 246—250.
82. **Лонгейр М. С., Сюняев Р. А.**//Успехи физ. наук. 1971. Т. 105, вып. 1. С. 41—96.
83. **Weiss R.**//Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1980. Vol. 18. P. 489—536.
84. **Partridge R. B.**//Phys. Scripta. 1980. Vol. 21, N 2. P. 624—629.
85. **Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.** Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975.
86. **Yang J., Turner M. S., Steigman G.**//Astrophys. J. 1984. Vol. 281, N 2. P. 493—511.
87. **Дэвис М.**//На переднем крае астрофизики/Под ред. Ю. Эвретта: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. С. 494—546.
88. **Зельдович Я. Б., Сюняев Р. А.**//Письма в астрон. журн. 1980. Т. 6, № 8. С. 451—456.

ГЛАВА 46

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

К. А. Кикоин

Периодическая система отражает закон изменения физико-химических свойств элементов с изменением заряда ядра Z и числа электронов во внешней оболочке атомов (периодический закон).

В первоначальном варианте таблицы Д. И. Менделеева элементы располагались в порядке возрастания атомных масс и группировались по сходству химических свойств. Объяснение периодическому закону и структуре периодической системы в дальнейшем было дано на основе квантовой теории строения атома. Оказалось, что последовательность расположения элементов в таблице определяется зарядом ядра, а периодичность физико-химических свойств связана с существованием электронных оболочек атома, постепенно заполняющихся с возрастанием Z.

Состояние электрона в атоме зависит от главного квантового числа n, орбитального квантового числа l, его проекции m, спинового числа s и его проекции σ. Электроны с разными n и l образуют разные оболочки. С учетом принципа Паули число электронов в оболочке с индексом l не может быть больше $2(2l+1)$. В зависимости от значения $l=0, 1, 2, 3...$ оболочки обозначают буквами $s, p, d, f, g, h, i, k, l, m$ ...

Современная таблица химических элементов построена таким образом, что при переходе от какого-либо элемента к следующему заряд ядра увеличивается на единицу и к оболочке добавляется один электрон. Заряд ядра определяет порядковый номер элемента.

По способу заполнения электронных оболочек все элементы разбиты на периоды. В первый период входят два элемента (H, He), у которых застраивается 1 s-оболочка. Второй и третий периоды содержат по восемь элементов, у которых застраиваются сначала s^2-оболочки ($2s^2$ и $3s^2$), а затем p^6-оболочки ($2p^6$ и $3p^6$). Первые три периода обычно называют малыми.

Периоды с четвертого по седьмой занимают в таблице по два ряда; их обычно называют большими. У элементов четвертого и пятого периодов прежде всего застраиваются s^2-оболочки ($4s^2$ и $5s^2$). После этого заполняются d^{10}-оболочки предыдущих слоев ($3d^{10}$ и $4d^{10}$) и, наконец p^6-оболочки ($4p^6$ и $5p^6$). Оба эти периода содержат по 18 элементов.

Оболочки элементов шестого и седьмого периодов также застраиваются в одинаковой последовательности: сначала заполняются внешние s-оболочки ($6s^2$ и $7s^2$), после этого появляется один электрон в предыдущей d-оболочке (в атомах La и Ac), но у последующих элементов в основном заполняются глубокие f-оболочки ($4f^{14}$ и $5f^{14}$) и лишь после этого достраиваются d-оболочки ($5d^{10}$ и $6d^{10}$).

Элементы, у которых заполняются не внешние, а более глубокие оболочки, называют переходными. Так, в четвертом периоде к переходным относятся элементы от Sc до Zn, у которых застраиваются 3 d-оболочки, в пятом — от Y до Cd ($4d$-переходные элементы), в шестом — от La до Hg, в седьмом — все актиноиды.

Седьмой период остался недостроенным, поскольку у элементов с $Z>83$ отсутствуют устойчивые изотопы, причем их нестабильность возрастает с увеличением Z. Таблица, таким образом, заканчивается последним из полученных искусственным путем элементов с $Z=107$. Неустановившиеся названия, недостоверные электронные конфигурации и гипотетические массовые числа наиболее долгоживущих изотопов радионуклидов приведены в скобках.

Взаимодействие электронов в оболочках приводит к тому, что у некоторых элементов оболочки заполняются не так, как им предписывает система: в четвертом периоде в атомах Cr и Cu число d-электронов увеличивается на два по сравнению с предшествующими им V и Ni за счет одного из 4 s-электронов; в пятом периоде подобная «аномалия» наблюдается у Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, причем у Pd г d-оболочку «переходят» оба 5 s-электрона; наконец, в шестом периоде на один s-электрон меньше, чем остальные, имеют атомы Os, Pt и Au; в f-переходных металлах конкурируют по энергии f- и d-состояния, поэтому у некоторых элементов очередной электрон попадает не в $4f$- ($5f$)-оболочку, а в $5d$- ($6d$)-оболочку: это происходит у Gd, Tb, Lu в группе редких земель и у Pa, U, Np, Cm, Bk, Lw — в группе актиноидов.

Кроме горизонтального разделения элементов в таблице по периодам производится вертикальное разделение их по группам. Элементы, входящие в каждую группу, имеют одинаковое строение внешних электронных оболочек. В помещенное на форзаце «коротком» варианте таблицы каждый из больших периодов разбит на два ряда, помещенных один под другим, поэтому наряду с главными группами возникают побочные. В первых двух группах главную подгруппу составляют элементы, имеющие соответственно один и два s-электрона на внешней оболочке (2, 3, 4, 6, 8 и 10-й ряды), а в побочную подгруппу выделяются элементы с заполненными d-оболочками (5, 7 и 9-й ряды). В группах с III по VII переходные элементы относятся к побочным подгруппам (4, 6, 8 и 10-й ряды), а элементы с незаполненными p-оболочками — к главным (2, 3, 5, 7 и 9-й ряды). Водород может быть отнесен к первой главной подгруппе как имеющий один электрон в s-оболочке и к седьмой, поскольку ему не хватает до заполненной оболочки одного электрона (см. пунктирную линию на рис. 46.1, которая указывает на эти две возможности). У элементов инертных газов, составляющих восьмую группу, застроены все оболочки. Эти элементы замыкают периоды. Названия элементов главных подгрупп в таблице смещены влево, а побочных — вправо. В отдельные группы (триады) выделены переходные элементы с почти заполненными d-оболочками (группы железа, палладия и платины). Особые группы составляют также элементы с застраиваемыми f-оболочками (лантаноиды и актиноиды).

Многие физические свойства элементов связаны с положением, которое они занимают в периодической системе. Так, атомные массы элементов возрастают с увеличением порядкового номера (исключение из этого правила составляют пары Ar—K, Co—Ni, Te—I); к магнитному упорядочению способны только металлы с незаполненными 3- и 4-й оболочками (исключением является твердый кислород), а сверхпроводящими свойствами в основном обладают парамагнитные переходные металлы четвертого — седьмого периодов; полупроводники располагаются в середине периодов в главных подгруппах III, IV и VI, а полуметаллы — в главной подгруппе V; все периоды заканчиваются диэлектрическими кристаллами. Отчетливую периодичность обнаруживают и другие физические свойства.

Для выявления закономерностей изменения физических свойств элементов удобно располагать их в «длинную» периодическую систему, в которой всем элемен-

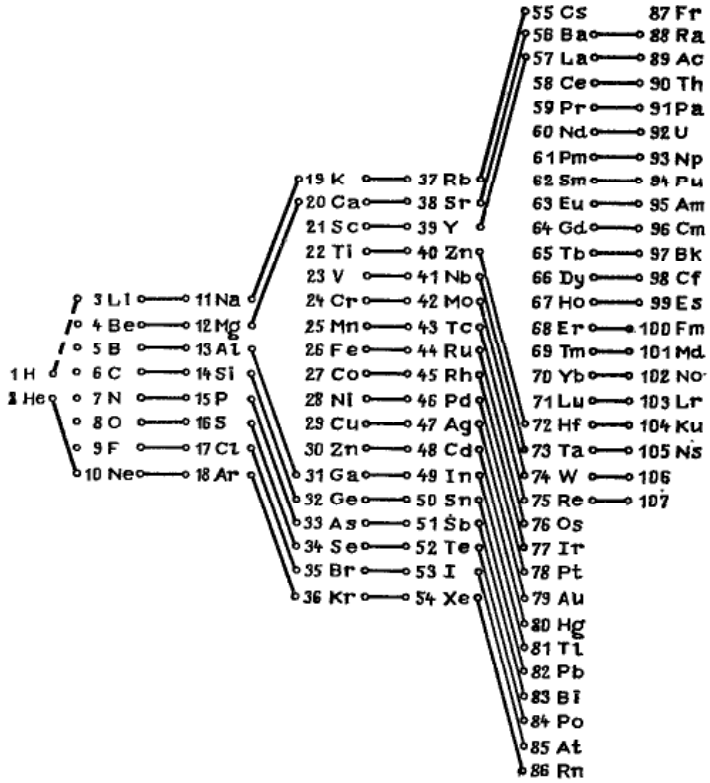


Рис. 46.1. «Длинная» периодическая система элементов

там, имеющим одинаковую структуру внешних электронных оболочек, отводится по отдельной группе [1]. Длинную таблицу нередко изображают в компактной ступенчатой форме (рис. 46.1), располагая периоды один за другим симметрично относительно оси таблицы, и соединяя линиями элементы, принадлежащие к одной группе [2]. Другая форма длинной таблицы использована для построения периодической системы физических свойств элементов (см. таблицу на форзаце). В этой таблице представлены атомные и термодинамические характеристики физических элементов в твердой кристаллической фазе при атмосферном давлении. Указан тип решетки, в которой элемент кристаллизуется при температуре 20 °С (для веществ, которые при нормальных условиях находятся в жидком или газообразном состоянии, указана фаза, в которую они переходят в результате охлаждения при атмосферном давлении). Приведены атомные и ионные радиусы (по Полингу) для основных валентностей элементов, а также температуры кипения, плавления, магнитных и сверхпроводящих переходов. Для немагнитных кристаллов указан тип магнитной восприимчивости (парамагнитная или диамагнитная). Приведены также значения температуры Дебая, определенные для большинства элементов из данных по теплоемкости при температуре 20 °С.

Диэлектрики, полупроводники, полуметаллы и металлы выделены соответственно шрифтом (светлый, штриховка, сетка и жирный).

Литературные источники, из которых взяты данные по температурам фазовых переходов, приведены в соответствующих разделах Справочника (см. гл. 12, 21, 27, 28). Значения температуры Дебая взяты в основном из обзора [3], а недостающие в нем данные — из [4]. Остальные характеристики элементов в кристаллической фазе приведены в соответствии с [5, 6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lexikon** der Physik: Bd 3. Stuttgart, 1969.

2. **Handbuch** der Physik. Bd 36, Springer Verlag, 1956.

3. **Cschneidner K. A. J.** Sol. State Phys. 1964. Vol. 16. P. 275.

4. **Ашкрофт Н., Мермин Н.** Физика твердого тела. М.: Мир, 1979.

5. **Физический** энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1960—1969.

6. **Энциклопедия** неорганических материалов. Киев: Высшая школа, 1977.

МЮОН

Масса $m_\mu = 1{,}883\,532\,7(11)\cdot10^{-28}$ кг $= 0{,}113\,428\,913(17)$ а. е. м.

$$m_\mu c^2/\{e\} = 105{,}658\,389(34) \text{ МэВ}$$

Магнитный момент $\mu_\mu = 4{,}490\,451\,4(15)\cdot10^{-26}$ Дж·Тл$^{-1}$

$$\mu_\mu/\mu_N = 8{,}890\,598\,1(13)$$

Аномалия магнитного момента $a_\mu = \dfrac{\mu_\mu}{e\hbar/(2m_e)} - 1 = 1{,}165\,923\,0(84)\cdot10^{-6}$ g-фактор,

$g_\mu = 2(1 + a_\mu) = 2{,}002\,331\,846(17)$

ПРОТОН

Масса $m_p = 1{,}672\,623\,1(10)\cdot10^{-27}$ кг $= 1{,}007\,276\,470(12)$ а. е. м.

$$m_p c^2/\{e\} = 938{,}272\,31(28) \text{ МэВ}$$

Отношение массы протона к массе электрона $m_p/m_e = 1836{,}152\,701(37)$
Удельный заряд $e/m_p = 9{,}578\,830\,9(29)\cdot10^7$ Кл·кг$^{-1}$
Комптоновская длина волны $\lambda_{C,p} = 1{,}321\,410\,02(12)\cdot10^{-15}$ м
Магнитный момент $\mu_p = 1{,}410\,607\,61(47)\cdot10^{-26}$ Дж·Тл$^{-1}$

$$\mu_p/\mu_N = 2{,}792\,847\,386(63)$$

Поправка на диамагнитное экранирование для сферического образца H_2O при 25 °С,

$1 - \dfrac{/\mu_p}{\mu_p'/} = 25{,}689(15)\cdot10^{-6}$

Магнитный момент без поправки на диамагнетизм

$$\mu_p' = 1{,}410\,571\,38(47)\cdot10^{-26} \text{ Дж·Тл}^{-1}$$

Гиромагнитное отношение $\gamma_p = 26\,752\,212\,8(81)\cdot10^4$ с$^{-1}$·Тл$^{-1}$

НЕЙТРОН

Масса $m_n = 1{,}674\,928\,6(10)\cdot10^{-27}$ кг $= 1{,}008\,664\,904(14)$ а. е. м.
Отношение массы нейтрона к массе протона $m_n/m_p = 1{,}001\,378\,404(9)$
Комптоновская длина волны $\lambda_{C,n} = h/(m_n c) = 1{,}319\,591\,10(12)\cdot10^{-15}$ м
Магнитный момент* $\mu_n = 0{,}966\,237\,07(40)\cdot10^{-26}$ Дж·Тл$^{-1}$

* Скалярная величина магнитного момента.

$$\mu_n/\mu_N = 1{,}913\,042\,75(45)$$

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Авогадро постоянная $N_A = 6{,}022\,136\,7(36)\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$
Атомная единица массы $m_u = m(^{12}C)/12 = 1{,}660\,540\,2(10)\cdot10^{-27}$ кг

$$m_u = c^2/\{e\} = 931{,}494\,32(98) \text{ МэВ}$$

Атмосфера стандартная, 1 атм — 101 325 Па (точно)
Больцмана постоянная $k = R/N_A = 1{,}380\,658(12)\cdot10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$
Излучение постоянная первая $c_1 = 2\pi hc^2 = 3{,}741\,774\,9(22)\cdot10^{-16}$ Вт·м^2
вторая $c_2 = hc/k = 0{,}014\,387\,69(12)$ м·К
Объем моля идеального газа при $T = 273{,}15$ К и $p = 101\,325$ Па,

$$V^m = RT/p = 22{,}414\,10(19) \text{ л/моль}$$

Стефана — Больцмана постоянная $\sigma = \pi^2k^2/(60\hbar^3c^2) = 5{,}670\,51(19)\cdot10^{-8}$ Вт·м$^{-2}$·К$^{-4}$
Ускорение силы тяжести (стандартное) $g_n = 9{,}806\,65$ м·с$^{-2}$ (точно)
Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}314\,510(70)$ Дж·моль$^{-1}$·К$^{-1}$
Фарадея постоянная $F = N_A e = 96\,485{,}309(29)$ Кл·моль$^{-1}$
Электрон-вольт {e}, 1 эВ $= 1{,}602\,177\,33(49)\cdot10^{-19}$ Дж

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Скорость света в вакууме $c = 299\,792\,458$ м·с$^{-1}$ (точно)
Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7} = 12{,}566\,370\,614\cdot10^{-7}$ Гн·м$^{-1}$ (точно)
Электрическая постоянная $\varepsilon_0 = 8{,}854\,187\,817\cdot10^{-12}$ Ф·м$^{-1}$ (точно)
Гравитационная постоянная $G = 6{,}672\,59(85)\cdot10^{-11}$ м^3·кг$^{-1}$·с$^{-2}$
Планка постоянная $h = 6{,}626\,075\,5(40)\cdot10^{-34}$ Дж·с
Планковская масса $(\hbar c/G)^{1/2} = m_{\mathrm{Pl}} = 2{,}176\,71(14)\cdot10^{-6}$ кг
длина $\hbar/(m_{\mathrm{Pl}}c) = l_{\mathrm{Pl}} = 1{,}616\,05(10)\cdot10^{-35}$ м
время $l_{\mathrm{Pl}}/c = t_{\mathrm{Pl}} = 5{,}390\,56(34)\cdot10^{-44}$ с

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Элементарный заряд $e = 1{,}602\,177\,33(49)\cdot10^{-19}$ Кл
Квант магнитного потока $\Phi_0 = h/(2e) = 2{,}067\,834\,61(61)\cdot10^{-15}$ Вб
Джозефсона отношение $2e/h = 4{,}835\,976\,7(14)\cdot10^{14}$ Гц·В$^{-1}$
Квант холловского сопротивления $R_{\mathrm{H}} = h/e^2 = 25\,812{,}805\,6(12)$ Ом
Бора магнетон $\mu_{\mathrm{B}} = e\hbar/(2m_e) = 9{,}274\,015\,4(31)\cdot10^{-24}$ Дж·Тл$^{-1}$

$\mu_{\mathrm{B}}/\{e\} = 5{,}788\,382\,63(52)\cdot10^{-5}$ эВ·Тл$^{-1}$

Ядерный магнетон $\mu_N = e\hbar/(2m_p) = 5{,}050\,786\,6(17)\cdot10^{-27}$ Дж·Тл$^{-1}$

$\mu_N/\{e\} = 3{,}152\,451\,66(28)\cdot10^{-8}$ эВ·Тл$^{-1}$

АТОМНЫЕ ПОСТОЯННЫЕ

Тонкой структуры $\alpha = \mu_0 ce^2/(2h) = 7{,}297\,353\,08(33)\cdot10^{-3}$

$\alpha^{-1} = 137{,}035\,989\,5(61)$

Ридберга постоянная $R_\infty = mec\alpha^2/(2h) = 10\,973\,731{,}534(13)$ м$^{-1}$

$R_\infty c = 3{,}289\,841\,949\,9(39)\cdot10^{15}$ Гц

$R_\infty hc/\{e\} = 13{,}605\,698\,1(40)$ эВ

Бора радиус $a_0 = \alpha/(4\pi R_\infty) = 0{,}529\,177\,249(24)\cdot10^{-10}$ м
Хартри энергия $E_{\mathrm{H}} = 2R_\infty hc = 4{,}359\,748\,2(26)\cdot10^{-18}$ Дж

$E_{\mathrm{H}}/\{e\} = 27{,}211\,396\,1(81)$ эВ

ЭЛЕКТРОН

Масса $m_e = 9{,}109\,389\,7(54)\cdot10^{-31}$ кг $= 5{,}485\,799\,03(13)\cdot10^{-4}$ а. е. м.

$m_e c^2/\{e\} = 0{,}510\,999\,06(15)$ МэВ

Удельный заряд $-e/m_e = -1{,}758\,819\,62(53)\cdot10^{11}$ Кл·кг$^{-1}$
Молярная масса $M_e = 5{,}485\,799\,03(13)\cdot10^{-7}$ кг/моль
Комптоновская длина волны $\lambda_{\mathrm{C}} = h/(m_e c) = 2{,}426\,310\,58(22)\cdot10^{-12}$ м
Классический радиус $r_e = \alpha^2 a_0 = 2{,}817\,940\,92(38)\cdot10^{-15}$ м
Томсоновское сечение рассеяния $\sigma_e = (8\pi/3)r_e^2 = 0{,}665\,246\,16(18)\cdot10^{-28}$ м^2
Магнитный момент $\mu_e = 928{,}477\,01(31)\cdot10^{-26}$ Дж·Тл$^{-1}$

$\mu_e/\mu_{\mathrm{B}} = 1{,}001\,159\,652\,193(10)$

Аномалия магнитного момента $a_e = \mu_e/\mu_{\mathrm{B}} - 1 = 1{,}159\,652\,193(10)\cdot10^{-3}$ g-фактор, $g_e = 2(1 + a_e) = 2{,}002\,319\,304\,386(20)$